# DRENAJE E IMPERMEABILIZACIÓN DURANTE LA CONSTRUCCIÓN Y EXPLOTACIÓN DE TÚNELES

## ASPECTOS GENERALES. IMPORTANCIA DEL AGUA.

1. La experiencia indica que una gran parte de las dificultades importantes que surgen en la construcción de túneles está directa o indirectamente relacionada con el agua. El reconocimiento previo al proyecto y construcción debe intentar definir las circunstancias adversas en relación con el agua. Se ha criticado (Fig. 1) la importancia desmesurada que se otorga en informes previos a la descripción de las circunstancias geológicas en detrimento de otra información fundamental para la construcción de un túnel. La información que proporcione el reconocimiento debe ser interpretada y transformada en recomendaciones y propuestas concretas en relación con la construcción del túnel. La acumulación de datos por sí misma tiende a ser irrelevante.

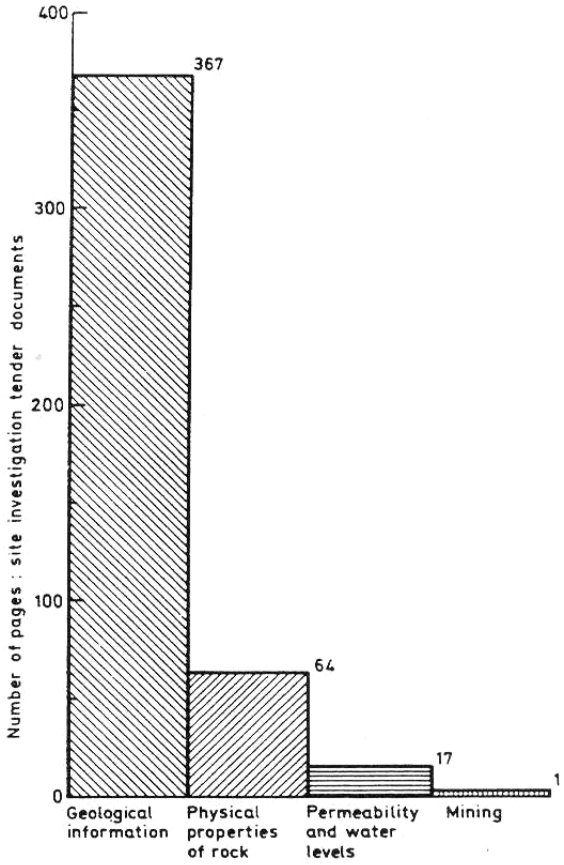



Fig. 1. Relación de informes dedicados a distintos ámbitos (Muir Wood & Kirkland, 1985)

2. La excavación reciente de algunas cavernas de almacenamiento de productos petrolíferos bajo el nivel freático, en presencia de fracturas en el macizo rocoso (Fig. 2) muestra el importante incremento de coste de excavación asignable a la presencia de agua. En uno de los casos indicados en la Fig. 2 (esquema de Vexin en Francia) las dificultades que originaron un sistema de fracturas en el macizo de creta donde se excavaron los diferentes túneles tuvieron una repercusión económica muy fuerte. Se da la circunstancia de que este proyecto contó con una abundante investigación previa de carácter geomecánico que fue aparentemente incapaz de detectar el riesgo asociado al sistema de fracturas saturadas de agua. Se concluye, en relación con los tres casos mencionados en la Fig. 2 que es conveniente disponer en obra, siempre listos, equipos de bombeo e inyección de la suficiente capacidad.

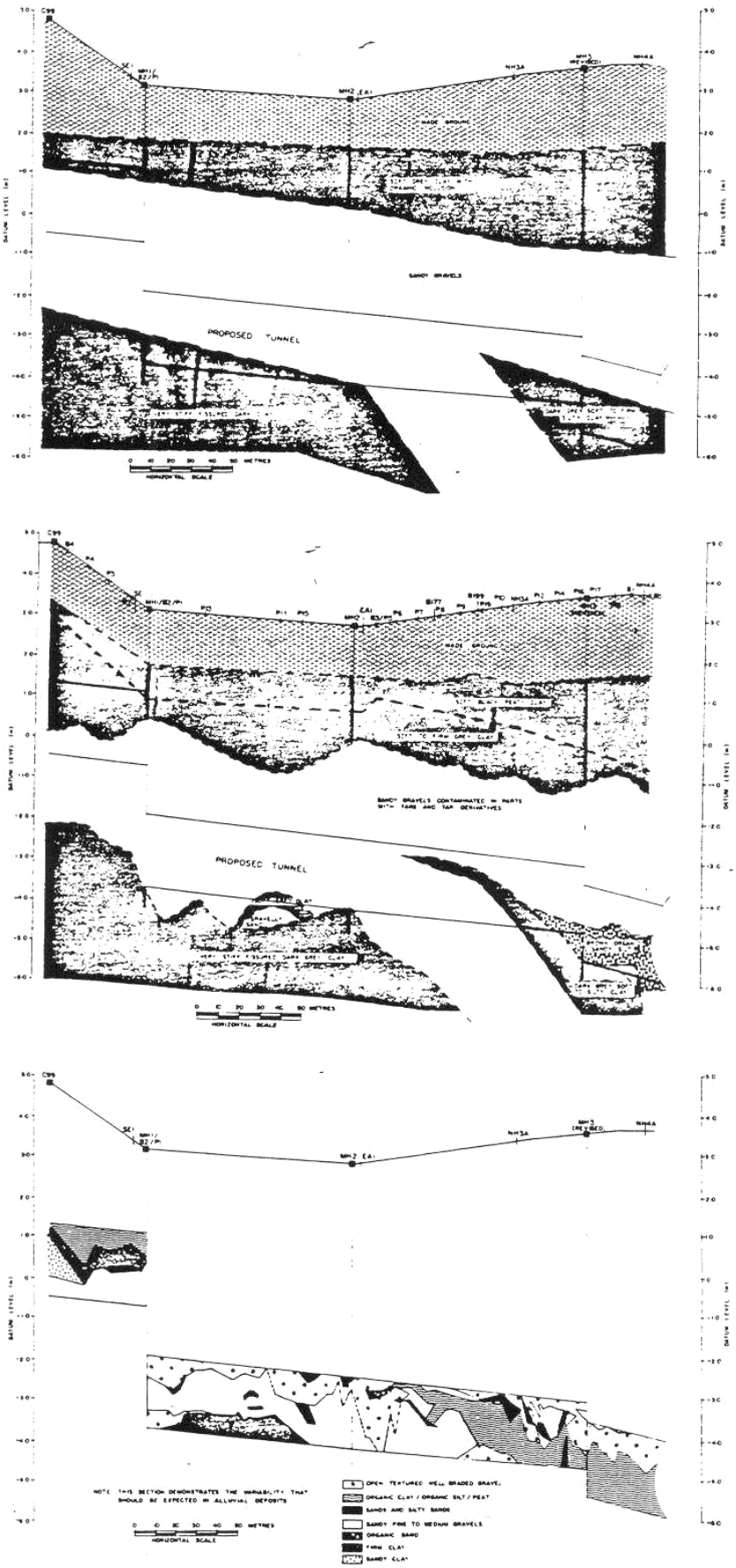
| | Linköping | Lavera | Vexin |
|---|---|---|---|
| Tipo de roca | GRANITO | CALIZA | CRETA |
| Volumen excavado ($m^3$) | 96000 | 150000 | 180000 |
| Volumen de almacenamiento ($m^3$) | 90000 | 123000 | 130000 |
| Profundidad por debajo del N.F. | 40 | 100 | 120 |
| Caudal de infiltración máximo ($m^3$/hora) | 20 | 300 | 470 |
| Filtración permanente | 65 | 15 | 80 |
| Permeabilidad media, $10^{-7}$ m/s | 1 | 1.2 | 3.5 |
| Perforación para inyección (m) | 3000 | 17000 | 34000 |
| Inyección (Ton.) | 300 | 1350 | 3500 |
| Incremento de coste debido a problemas relacionados con el agua (% del total) | 25 | 35 | 60 |

Fig. 2. Problemas asociados al agua en algunas cavernas de almacenamiento (G. Jansson, 1979)

Para el caso de *Vexin*, se realizaron numerosas investigaciones previas:

- Pozo vertical de reconocimiento 150 m, 3 $m^2$.
- Varias galerías de reconocimiento (la mayor de 50 m de longitud y 50 $m^2$ de sección) perforadas en roca homogénea e impermeable.
- Abundantes ensayos in situ.
- Sistema regional de fracturas con agua abundante*

3. La heterogeneidad del medio geológico impone dificultades al reconocimiento previo. Ello se ilustra en las Fig 3 y 4. En la Fig. 3 se ilustra la variabilidad esperable en terrenos aluviales a partir de los datos proporcionados por la excavación de un túnel en gravas del Támesis. En la Fig. 4 aparece una propuesta de tipo de reconocimiento cuando la variabilidad estratigráfica es notable.



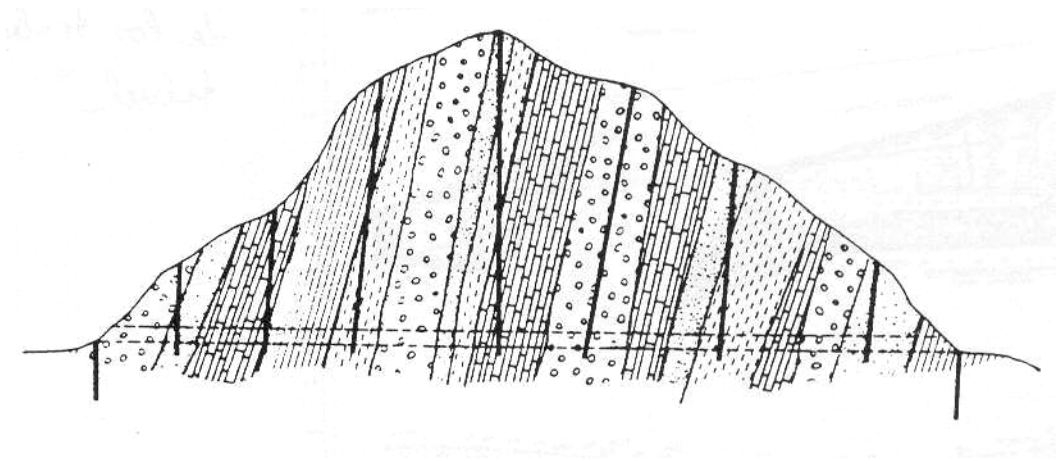

Según investigación previa a contrato de los trabajos del túnel

Según sondeos efectuados durante los primeros tiempos de la excavación

Terreno excavado en el túnel

Fig. 3. Variabilidad de terrenos aluviales (Juvann et al, 1985)

Disposición de sondeos poco correcta



Disposición más correcta

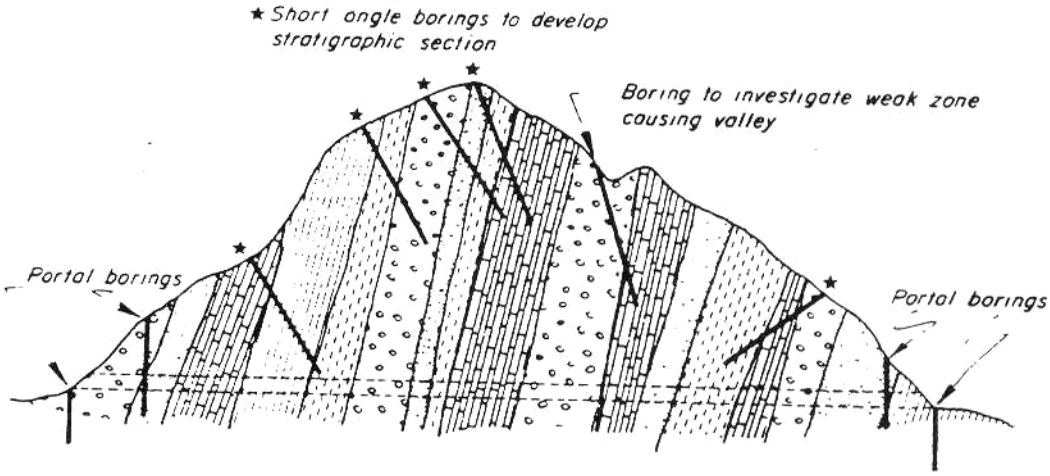
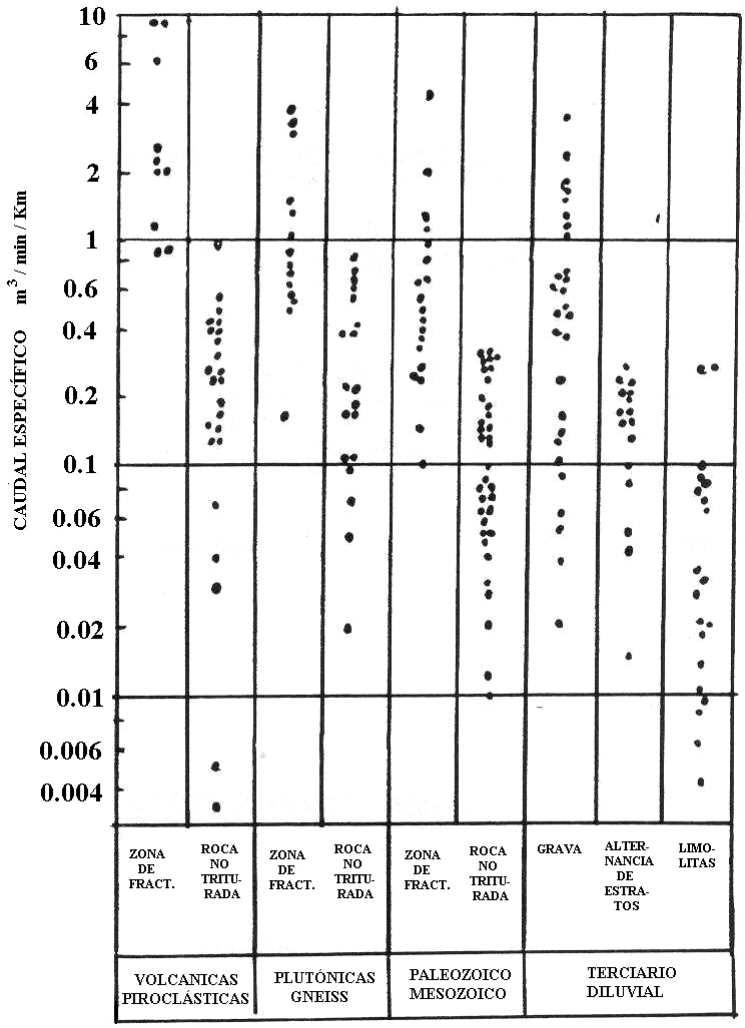



Fig. 4. Disposición de sondeos (Dodds, 1982)

## FLUJO DE AGUA HACIA UN TÚNEL

4. Los túneles, revestidos o no, tienden a actuar como drenes permanentes en el terreno (Ward y Pender, 1981). Los datos recogidos en la Fig. 5 muestran la importancia de la filtración hacia túneles en la red de ferrocarriles de Japón. No se detectan diferencias notables entre litologías (a excepción quizá de los terrenos volcánicos) y se advierte el notable incremento de caudales filtrados que suponen las zonas fracturadas debido al aumento de permeabilidad. La filtración hacia los túneles tiende a disminuir con el tiempo (Fig. 5, 6) seguramente como consecuencia de rebajamientos permanentes progresivos de niveles piezométricos. Algunas excepciones (incremento de caudales) pueden estar asociadas al lavado de juntas y pérdida de finos en las inmediaciones de los túneles donde los gradientes tienden a ser altos.

a)




b)

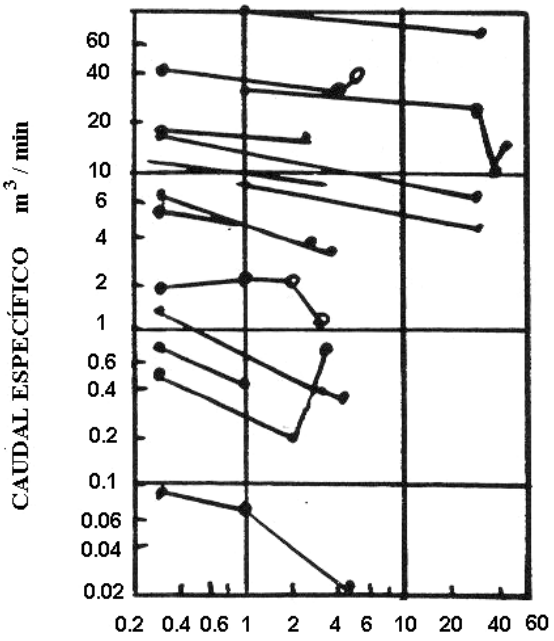
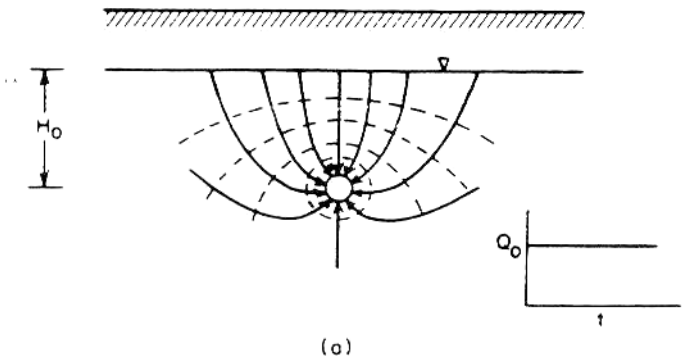



Fig. 5a y b. Filtración recogida por los túneles de la red de FF.CC. de Japón (Ishizaki,1979)

5. Existe un número limitado de expresiones analíticas para el cálculo de caudales filtrados hacia túneles. Algunas se han indicado en las Fig. 6, 7, y 8. Más información aparece en Custodio y Llamas (1976). En general las soluciones analíticas cubren un número escaso de situaciones. El rebajamiento de los niveles piezométricos con superficies de saturación variables en el tiempo plantea las mayores dificultades. Una valoración de los métodos numéricos disponibles para analizar los problemas de filtración con superficie libre ha sido hecha recientemente por Gioda y Desideri (1988).

- RÉGIMEN ESTACIONARIO:



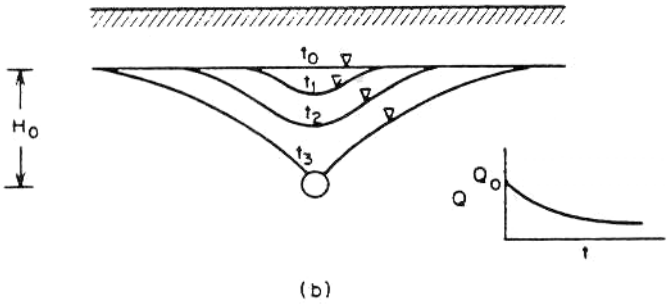

Red de flujo:

$$Q_0 = \frac{2\pi K \cdot H_0}{2.3 \cdot \log\left(\frac{2H_0}{r}\right)}$$

r: radio del túnel

*Goodman et al, 1965*

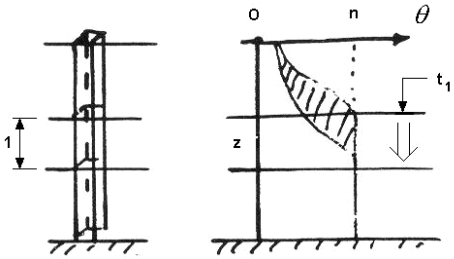
- RÉGIMEN TRANSITORIO:




Hipótesis:

- Parábolas
- Dupuit
- $t > t_3$

$$Q(t) = \left(\frac{8C}{3} K \cdot H_0^3 \cdot S_y \cdot t\right)^{1/2}$$

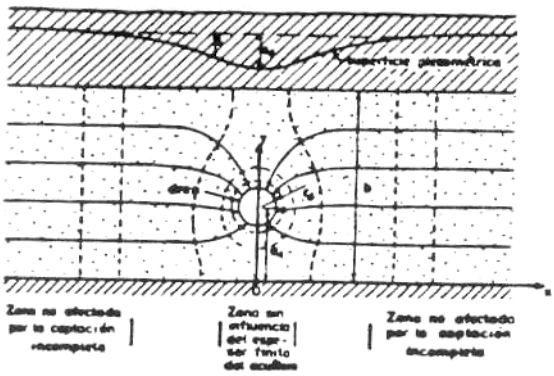



* $S_y$: almacenamiento especifico

$$S_y \approx 0.01 - 0.3$$

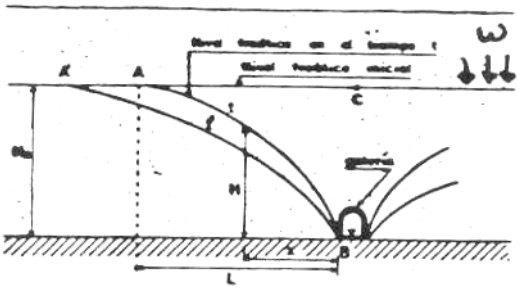
* $C$: constante: 0.5 (Dupuit)
0.75 (Modelos)

Fig. 6. Cálculo de caudales filtrados hacia túneles



$$s = \frac{q^*}{4\pi k}\left[-\ln\left[\frac{1}{4}\left(ch\frac{\pi x}{b} - \cos\frac{\pi(y+a_1)}{b}\right)\cdot\left(ch\frac{\pi x}{b} - \cos\frac{\pi(y-a_1)}{b}\right)\right] + 2\left(\frac{\pi L}{b} - \ln 4\right)\right]$$

$$s_0 = \frac{q^*}{4\pi k}\left[\frac{\pi L}{b} - \ln\left(\frac{2\pi r_d}{b}\cdot sen\frac{\pi a_1}{b}\right)\right]$$



$$q(t) = H_0\sqrt{\frac{0.5\cdot k\cdot\omega}{1-\exp\left(-\frac{6\omega}{H_0}t\right)}}$$

si $t \to \infty$

$$q = H_0\sqrt{\frac{k\omega}{2}}\cdot\omega\cdot L(\infty)$$

$$L(\infty) = H_0\sqrt{\frac{k}{2\omega}}$$

Fig. 7. Cálculo de caudales filtrados hacia túneles

$$V_g = C\frac{Q}{\upsilon\cdot p^e}$$

- siendo:

$Q$: l/m y por 100 m de túnel
$V_g$: Medida de la permeabilidad de la roca (en sondeos)

$$V_g = \frac{q_g}{L\cdot p_0}$$ donde: $q_g$: pérdida de agua en taladro (l/min)

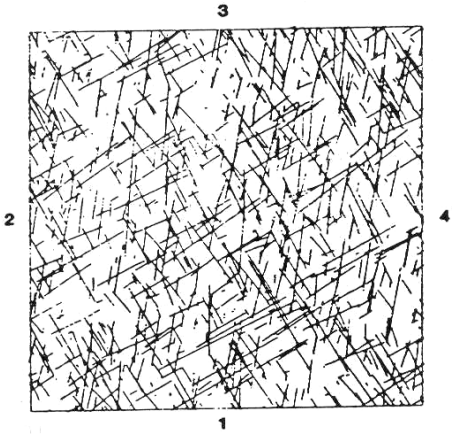
$p_0$: sobrepresión de agua
$L$: longitud de prueba

$\upsilon$ : perímetro del túnel en m
$e$: 0.5 (granito de Estocolmo)

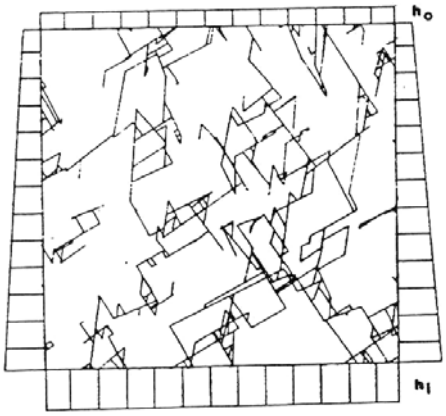
$p = \gamma_\omega z$

Fig. 8. Filtraciones hacia túneles en el metro de Estocolmo (Brune et al, 1980)

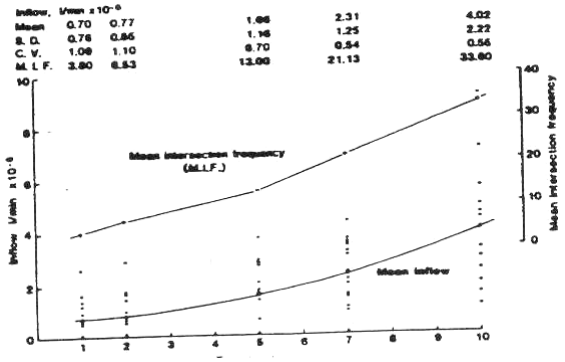
6. Un parámetro fundamental y de difícil determinación para la obtención de caudales es la permeabilidad del terreno. En medios fracturados se han utilizado con frecuencia técnicas de homogeneización con el fin de obtener permeabilidades equivalentes de medio continuo. Una alternativa es la simulación de las familias de discontinuidades presentes (Fig. 9 a) y a partir de sus conexiones hidráulicas (Fig. 9 b) resolver el problema de flujo hacia un túnel excavado en un macizo rocoso así generado. Un análisis de este tipo (Fig. 9 c) muestra que el caudal medio hacia el túnel crece con su radio, aproximadamente en la misma proporción que crece la frecuencia de intersecciones con fracturas activas hidráulicamente. Este análisis muestra también que el coeficiente de variación de los caudales calculados disminuye con el tamaño del túnel, lo que refleja un efecto promedio en túneles de mayor tamaño (Fig. 9 c).




a) Simulación de macizo diaclasado




b) Malla interconectada y condiciones de contorno




c) Influencia del tamaño de la excavación en el caudal filtrado

Fig. 9. Predicción de caudales infiltrados a través

## EFECTO DE FLUJO SOBRE LAS CONDICIONES MECÁNICAS DE LOS TÚNELES

7. Una parte de la carga que el terreno, en presencia de agua en filtración, ejerce sobre el revestimiento de un túnel lo constituye la distribución de presiones de agua sobre el mismo. La distribución de presiones de agua sobre un revestimiento impermeable puede calcularse fácilmente a partir de una red de corriente. En el caso concreto de las Figs. 10 y 11 se ilustra el efecto que sobre las presiones de agua ejercidas sobre el revestimiento de un túnel, tiene la mayor o menor proximidad de un túnel de drenaje.

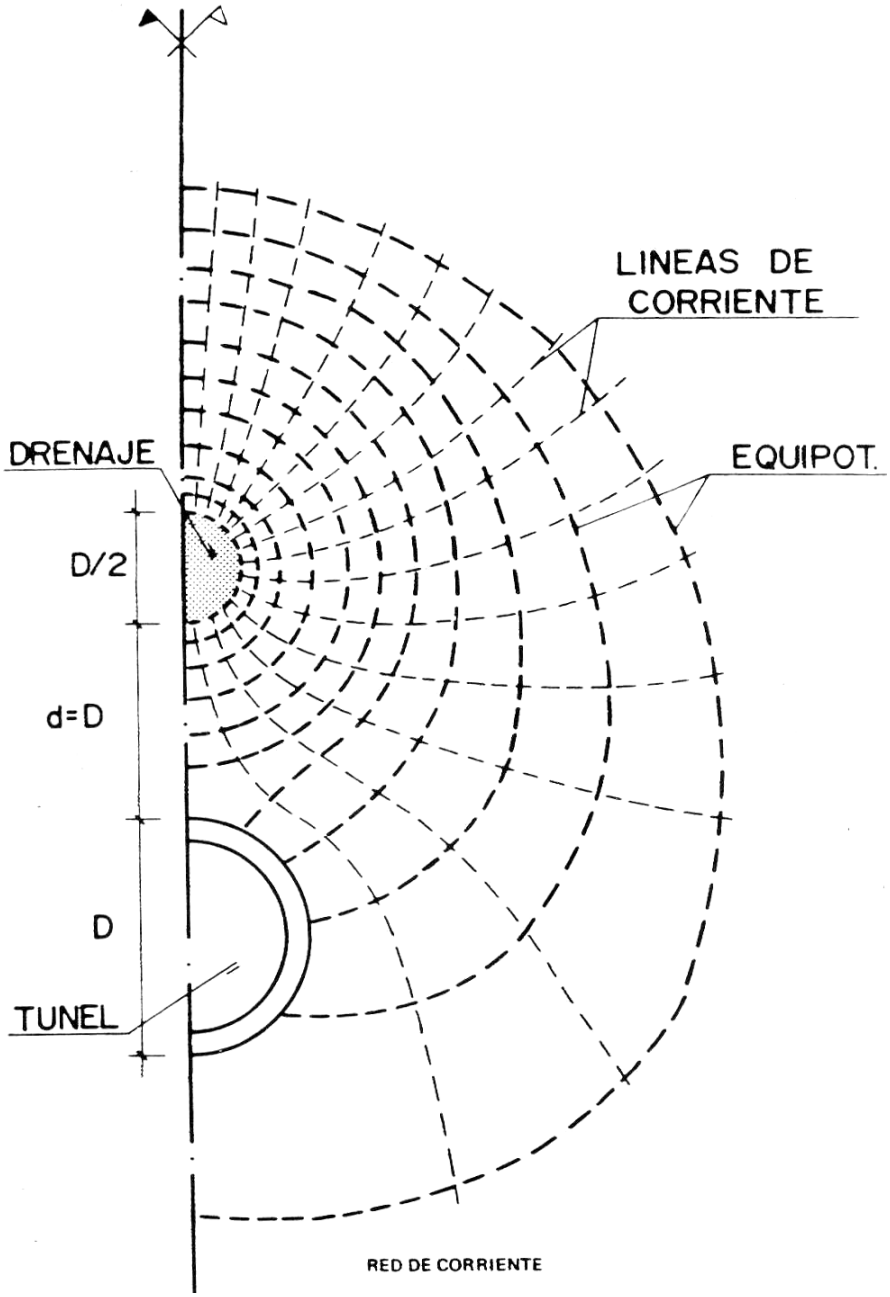



Fig. 10. Red de corriente con proximidad de un túnel de drenaje (Oteo, 1982)

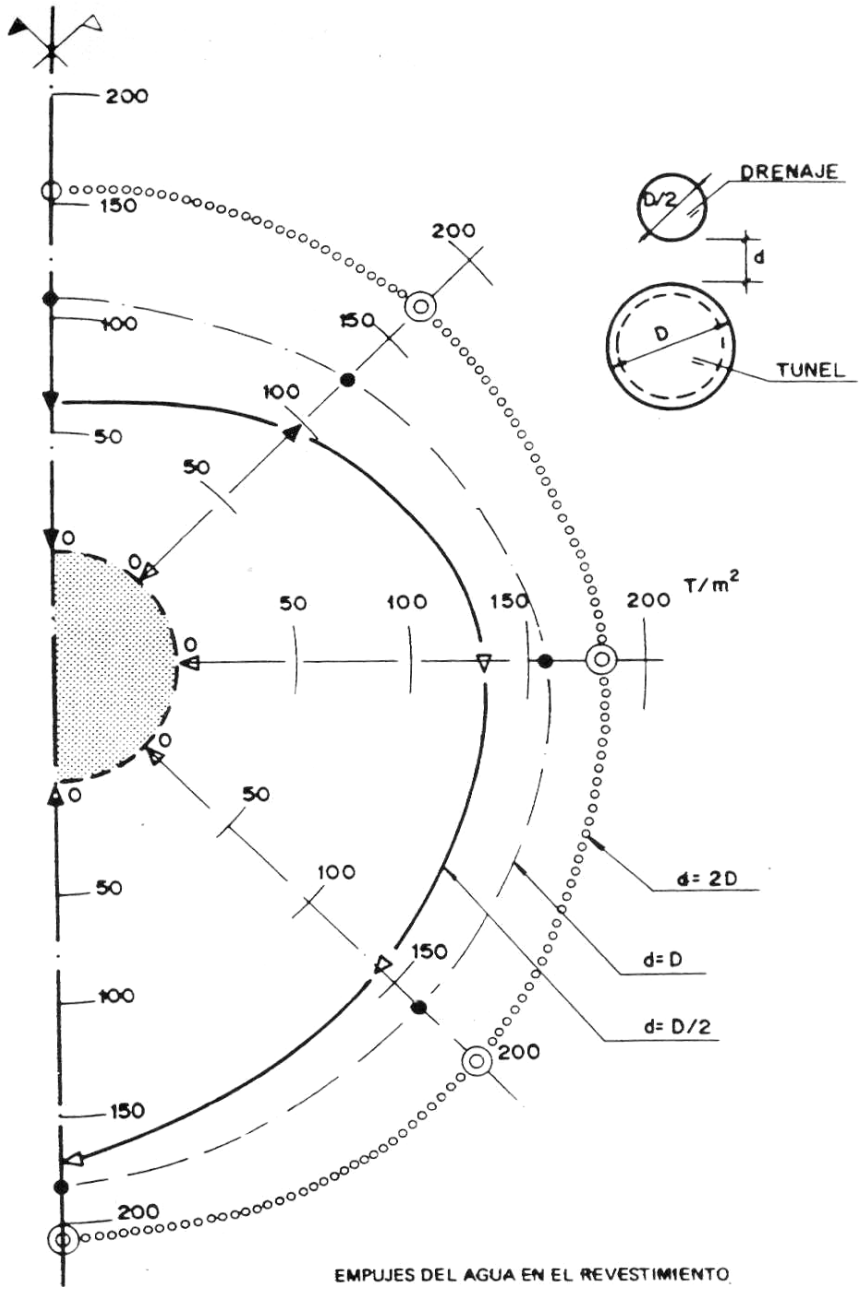
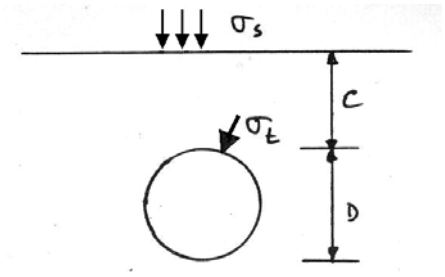



Fig. 11. Empujes del agua en el revestimiento de un túnel con túnel de drenaje (Oteo, 1982)

8. Las tensiones totales sobre el revestimiento han de calcularse sin embargo como suma de las tensiones efectivas y de las presiones de agua. En presencia de filtración, a las fuerzas de masa habituales (peso) ha de añadirse una fuerza proporcional al gradiente. Con las hipótesis que aparecen en la Fig. 12, Atkinson y Mair (1983) publicaron un análisis simplificado de las cargas totales sobre el revestimiento de un túnel en los casos extremos de agua en reposo (túnel estanco) (Fig. 13 a) y flujo estacionario hacia el túnel (que mantiene en su periferia una presión nula de agua, es decir un túnel drenado) (Fig. 13 b). En este análisis se llega la conclusión de que en ambos casos las cargas son iguales. Este resultado puede ser explicado de forma muy sencilla: las fuerzas de masa inducidas por la filtración (en el caso de túnel drenado)

equivalen a la presión hidrostática de agua (en el caso de túnel estanco). Una consecuencia de este análisis es que no se reduce la carga sobre un revestimiento por hacerle drenante.




Hipótesis:

- Revestimiento liso
- Carga hidrostática o flujo esta-cionario
- Flujo radial. Nivel piezométrico no afectado por túnel

$$\sigma_t = \sigma_g^{'} + \sigma_i^{'} + u$$

donde:

> $\sigma_g^{'}$ : tensión efectiva en ausencia de fuerzas de masa debidas al agua

* EJEMPLOS:

1) En ausencia de deformación: $\sigma_g^{'} = C \cdot \gamma' + \sigma_s$ (clave)
2) En colapso: $\sigma_g^{'} = \gamma' \cdot D \cdot T_\gamma(\varphi') + \sigma_s \cdot T_s(\varphi')$

> $\sigma_i^{'}$ : tensión debida al gradiente de agua

> $u$ : presión de agua

Fig. 12. Cargas sobre el revestimiento originadas por el agua (Atkinson & Mair,1983)

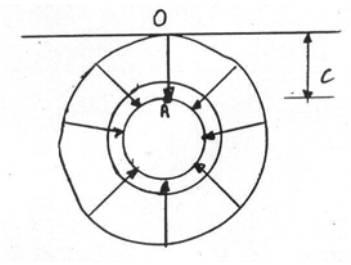
9. El análisis indicado en las Fig. 12 y 13 prescinde de la deformación del terreno. Si éste alcanza su rotura y si interesan además (como es necesario a efectos prácticos) la relación entre deformación del túnel y presión de revestimiento, el análisis anterior debe ser modificado. Incluso en el supuesto de que la permeabilidad del terreno sea constante y no afectada por la deformación, la distribución de gradientes no es uniforme. De hecho estos tienden a concentrarse en las inmediaciones del túnel y por ello esta zona, al recibir más fuerzas de masa, tenderá a deformarse más que zonas alejadas de la excavación. Por otra parte las inmediaciones de la excavación son las más tensionadas y en ellas se desarrollan lógicamente las zonas plásticas. Por ello es de suponer que, en terrenos que alcancen la rotura, las condiciones de filtración modifiquen la extensión de las zonas plásticas y en consecuencia modifiquen las relaciones sostenimiento-deformación (curvas características del túnel) que tanto dependen del grado de plastificación del terreno en las inmediaciones del túnel.

Si el terreno permanece en régimen elástico, es menos obvio que la filtración haga cambiar de forma importante los resultados de Atkinson y Mair aunque el cambio de hipótesis que introduce un análisis elástico con relación a las indicadas en la Fig. 12 lógicamente ha de tener algún efecto.

a) CARGA HIDROSTÁTICA: caso impermeable => No existe flujo.

$$u = \gamma_\omega \cdot C$$
$$\sigma_i^{'} = 0$$
$$\sigma_t = \sigma_g^{'} + \gamma_\omega \cdot C \quad \text{(en clave)}$$

b) FLUJO ESTACIONARIO: túnel profundo y permeable




* Fuerzas de masa: $\gamma_{\omega i} = -\gamma_\omega \dfrac{dh}{dz}$

* En clave: $\sigma_i' = \int_O^A -\gamma_\omega \dfrac{dh}{dz} dz = C \cdot \gamma_\omega$

$$u = 0$$

$$\sigma_t = \sigma_g^{'} + \gamma_\omega \cdot C$$

Fig. 13. Cargas sobre el revestimiento originadas por el agua (Atkinson & Mair,1983)

10. El análisis de la influencia de la filtración en el comportamiento mecánico del túnel puede abordarse mediante técnicas numéricas que resuelvan el problema acoplado flujo-deformación. Más útiles son probablemente los planteamientos analíticos y semianalíticos aunque deban introducir hipótesis simplificadoras con relación al comportamiento de los materiales, al grado de acoplamiento flujo-deformación y a la simetría del problema. Las hipótesis que se introducen en dos aportaciones recientes a este problema (Jiménez Salas, 1981; Jiménez Salas y Serrano, 1984 y Lembo Fazio y Ribacchi, 1984) se han resumido en la Fig. 14. Algunos aspectos de la solución obtenida por estos autores se presentan a continuación.

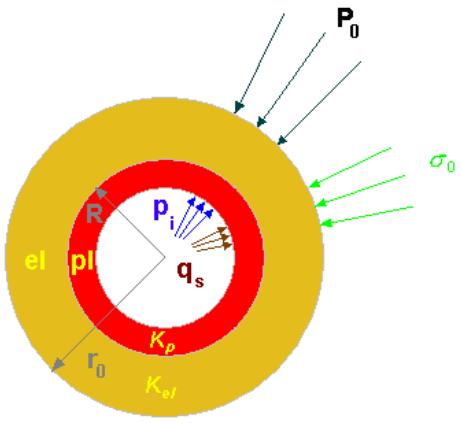



Fig. 14a. Influencia de la filtración sobre el comportamiento del túnel

| | **Lembo Facio + Ribacchi, 1984** | **Jiménez Salas, 1981 Jiménez Salas + Serrano, 1984** |
|---|---|---|
| FLUJO DE AGUA PERMEABI-LIDAD | Condiciones de contorno estacionarias: $t \to \infty$<br>• $K_{el} / K_{pl} = \alpha;\ \alpha \in [0,1]$<br>• Acoplado $K = K_0 \left( n / n_0 \right)^3$<br>$\Delta n = -\frac{(C - C_s)(1+\upsilon)(\Delta\sigma_1' + \Delta\sigma_3')}{3} + C_s \Delta p + \varepsilon_v^p$ | • Consolidación radial (desacoplada de proble-ma tensional)<br>$0^+ < t < \infty$<br>• Condiciones iniciales NO drenadas (Skempton / Henkel)<br>*K(r)* |
| SIMETRÍAS | • Radial<br>• No se consideran gradientes de z ($h \cong p_\omega$)<br>• $K_0 = 1$ | • Radial/Esférica<br>• No se consideran gradientes de z ($h \cong p_\omega$)<br>• $K_0 = 1$ |
| MATERIALES | Elastoplástico / Reblandecimiento<br>Mohr-Coulomb / Hoek-Brown<br>Matriz compresible | Elastoplástico perfecto<br>Mohr-Coulomb<br>Matriz incompresible |
| OBSERVA-CIONES | Suponer $p_{\omega i} = 0$<br>Estudian efecto de condiciones de per-meabilidad en:<br>• Curvas características<br>• Distribución de tensiones | Estudian efecto de $p_{\omega i}$ + otros factores en desarrollo zona plástica |

Fig. 14b. Influencia de la filtración sobre el comportamiento del túnel

11. Si el terreno se mantiene en régimen elástico las tensiones en el contorno del túnel y el desplazamiento radial del mismo, en el caso de existir un flujo hacia el túnel son prácticamente idénticos a la solución clásica en tensiones totales (Fig. 15).

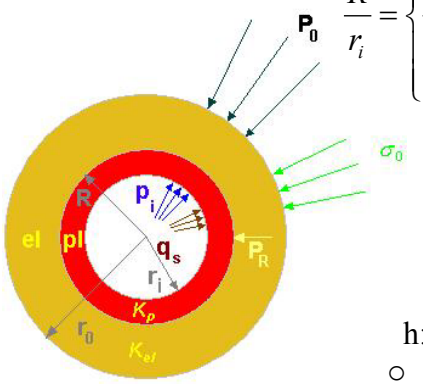
| Tensiones y desplazamientos en el contorno del túnel |
|---|
| • Solución clásica:<br>$\sigma_r = q_s$<br>$\sigma_\theta = 2\sigma_0 - q_s$<br>$u = \frac{1+\upsilon}{E}(\sigma_0 - q_s) \cdot r_i$ |
| • Con flujo:<br>$\sigma_r = q_s$ (independiente de la distribución de $p_\omega$)<br>$\sigma_\theta = 2\sigma_0 - q_s - \beta(p_0 - p_i)$ ; $\beta = \left(1 - \frac{C_s}{C}\right)\frac{1-2\upsilon}{1-\upsilon}$<br>$u = \frac{1+\upsilon}{E}(\sigma_0 - q_s) \cdot r_i$ |

Fig. 15. Análisis elástico con flujo

12. Sin embargo (Fig . 16 y siguientes), si existe un anillo de plastificación en torno al túnel, la influencia del régimen de filtración puede ser importante. En la Fig. 16 se han resumido las condiciones y criterios necesarios para obtener la solución, criterios que coinciden básicamente con los clásicos establecidos por muchos investigadores para el análisis elastoplástico del problema axisimétrico de un túnel en deformación plana (una referencia a todas estas contribuciones desde el año 1938 aparece en Brown et al, 1983). En la misma figura se ha indicado una expresión (Lembo Fazio i Ribacchi, 1984) para el radio adimensional de la zona plástica cuando existe filtración (en ausencia de tensiones en el contorno del túnel). El efecto del agua en filtración se contabiliza en un término h que representa el gradiente en la zona inmediata al túnel y en la expresión para la tensión de confinamiento, $\sigma_0$, en la que aparece la presión de agua en la transición de zonas elástica y plástica. El término de gradiente h se descuenta del término fr que es un parámetro proporcional a la cohesión del terreno. Su efecto es por tanto negativo y tiende a restar cohesión a la roca. Hemos de esperar por consiguiente que todos aquellos factores que tiendan a incrementar el gradiente de agua en las proximidades del túnel, incrementarán el tamaño de la zona plástica. La propia rotura del terreno, sin embargo, tiende a disminuir el gradiente de agua en la zona plástica (efecto beneficioso) pues la rotura va acompañada a fenómenos de dilatancia (mayor permebilidad) y a una mayor fracturación del terreno. Por esta razón, el cociente entre las permeabilidades del terreno en régimen elástico y en rotura será un número variable entre 1 y 0. La distribución de presiones de agua correspondiente a diferentes valores de esta razón aparece en la Fig. 17 a. En el caso límite (aumento fuerte de la permeabilidad del terreno tras la rotura) la zona plástica estará libre de presiones de agua.

| | |
|---|---|
| ZONA ELÁSTICA | * Equilibrio tensional + Ley $\sigma - \varepsilon$ + $\varepsilon - u$<br>▪ Ec. Diferencial en corrimientos: $u \rightarrow (\sigma_r, \sigma_\theta)$ |
| ZONA PLÁSTICA | * Equilibrio tensional + Ley de rotura<br>▪ Ec. Diferencial en tensiones<br>* Relaciones $\varepsilon - u$ + condiciones de dilatancia<br>▪ Ec. Diferencial en corrimientos |
| TRANSICIÓN ELASTOPLÁSTICA | * Continuidad de tensiones $(\sigma_r)$ y corrimientos |

Fig. 16a. Análisis elastoplástico con flujo




$$\frac{R}{r_i} = \left\{ \frac{\bar{\sigma}_0 + (f_r - h)(N_r - 1) - (\bar{\sigma}_0 + c' \cot g(\phi') sen(\phi'))}{q_s' + \frac{(f_r - h)}{N_r - 1}} \right\}^{\frac{1}{N_r - 1}}$$

$$f_r = \frac{2c' \cdot \cos(\phi')}{1 - sen(\phi')} \qquad N_r = \frac{1 + sen(\phi')}{1 - sen(\phi')}$$

$$\bar{\sigma}_0 = \sigma_0 - P_R - \beta \cdot \frac{P_0 - P_R}{2}$$

h: representa el gradiente de $p_\omega$ en la zona plástica

- Si $K$ uniforme => $h = (P_0 - P_i)/(\ln(r_0 / r_i))$
- Si $K_{pl} >> K_{el}$ => $h = 0$ (Beneficioso)

Fig. 16b. Extensión de zona plástica

13. El efecto de estas consideraciones en las curvas características del túnel aparece en las Figs. 17 a (utilizando un criterio de rotura del terreno tipo Mohr-Coulomb) o en la Fig. 17 b (criterio Hoek-Brown). En ambas figuras se compara la curva característica en ausencia de filtración con la resultante de utilizar diferentes hipótesis de distribución de permeabilidades. En general, si la zona plástica está drenada, las curvas características mejoran con relación a la solución en ausencia de agua. Una filtración con permeabilidad homogénea (y con mayor razón si la zona plástica adquiere una permeabilidad más pequeña – como sería el caso de una inyección en la misma -) empeora la situación.

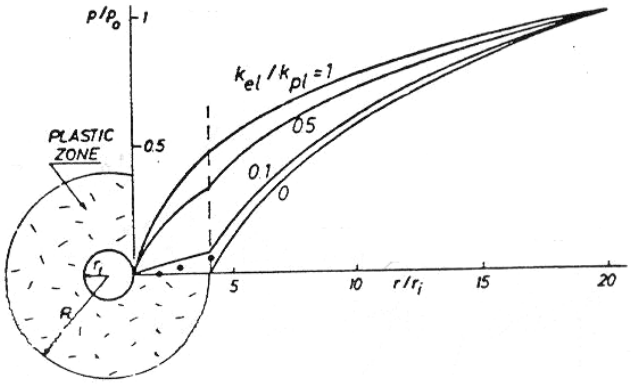



Fig. 17a (Rembo Faccio y Ribacchi, 1984)

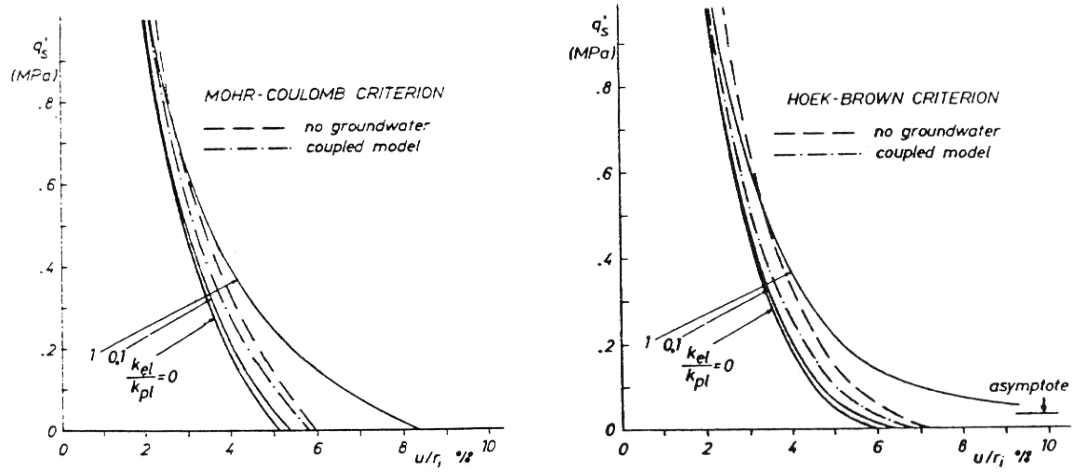



Fig. 17b y 17c (Rembo Faccio y Ribacchi, 1984)

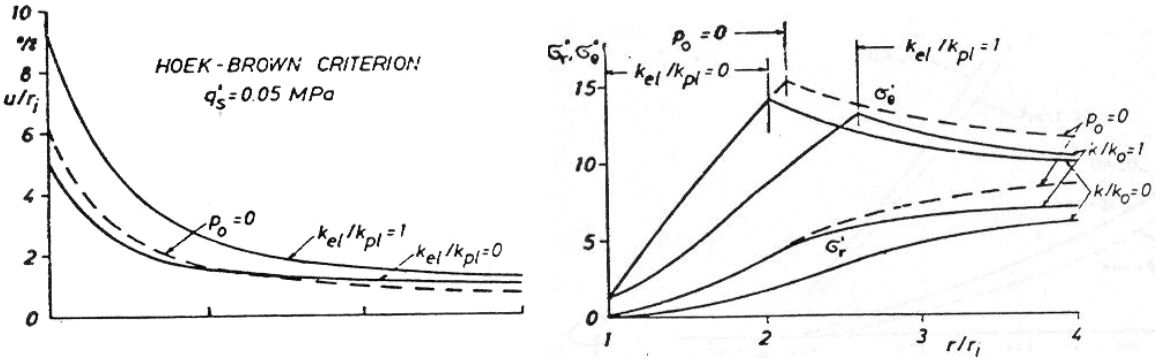
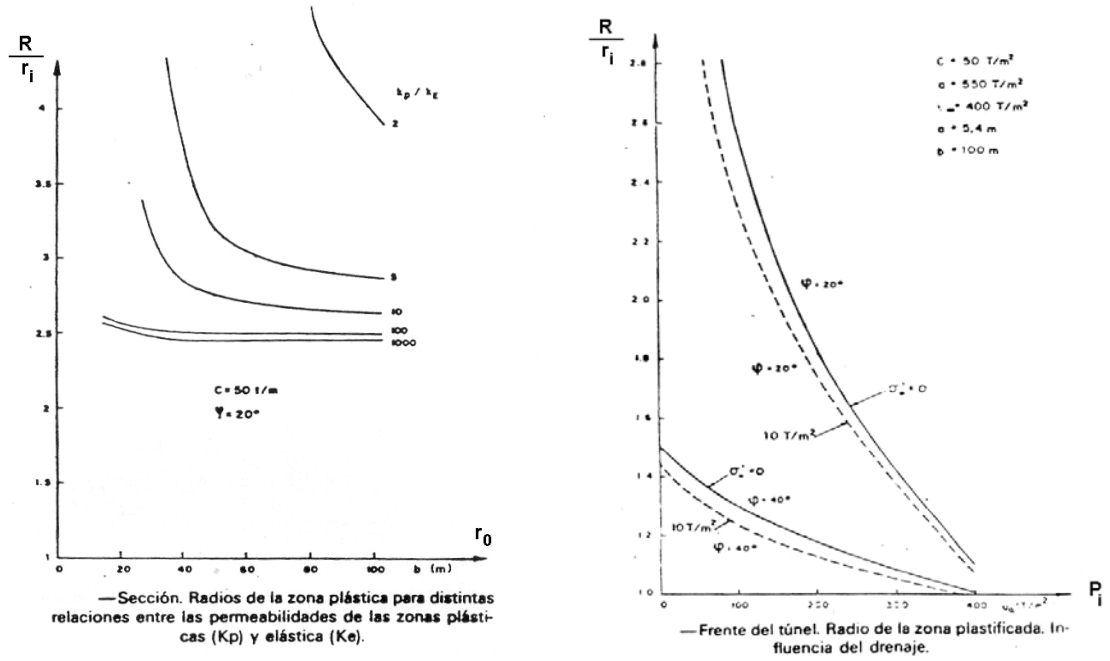



Fig. 17d (Rembo Faccio y Ribacchi, 1984)

En la Fig. 17d aparecen los desplazamientos en el contorno del túnel y la distribución de tensiones radiales y circunferenciales para dos hipótesis de distribución de permeabilidad y para el caso seco (clásico) ($p_0 = 0$).

14. Algunos resultados del análisis de Jiménez Salas y Serrano (1984) se han recogido en la Fig. 18. En la Fig. 18 a se observa como disminuye el radio de la zona plástica a medida que aumenta la permeabilidad de la zona plástica y se aleja el contorno exterior en el que se fija la presión de agua $p_0$. Ambas situaciones contribuyen a disminuir el gradiente de filtración en las inmediaciones de la pared del túnel. El efecto de la presión interior del agua (sobre el contorno de la excavación) en el desarrollo de la zona plástica está indicado en la Fig. 18b para dos valores de cohesión y ángulo de fricción del terreno.




Figs. 18 a y 18b (Jiménez Salas y Serrano, 1984)

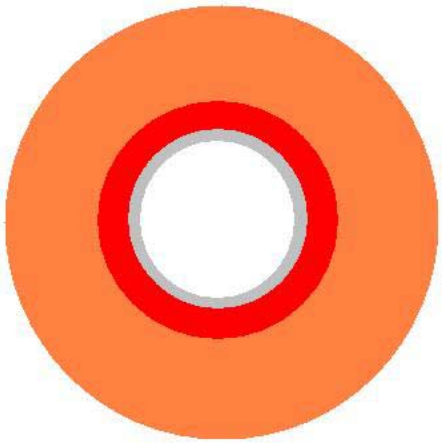
15. La discusión anterior se puede resumir en unas conclusiones que se han indicado en la Fig. 19. En la Fig. 20 se han dibujado unos cuantos esquemas de posibilidades alternativas de drenaje e inyección de un túnel que se interpretan con ayuda de los conceptos establecidos. En todos los esquemas se ha indicado (zona rayada) la extensión del anillo de plastificación entorno al túnel, siempre de forma cualitativa. La Fig. 20 a (túnel sin drenaje y sin inyección) puede tomarse como figura la referencia. El drenaje en el propio túnel (Fig. 20b) incrementa la extensión de la zona plástica lo que se ha de traducir en unas mayores necesidades de sostenimiento. Una combinación óptima desde el punto de vista de la estabilidad del túnel está indicada en la Fig. 20c. El drenaje es exterior a la zona inyectada. De esta manera se eliminan los gradientes en las inmediaciones del túnel y esta zona tiene además la resistencia adicional proporcionada por la inyección. Un aspecto negativo de esta solución en terrenos de alta permeabilidad es la necesidad de evacuar caudales importantes procedentes del drenaje. Dos situaciones que pueden darse si, además de inyectar las inmediaciones del túnel, se

drena en su contorno, se han indicado en las Figs. 20d y 20e. En estos casos la situación del drenaje en el propio túnel, contribuye a incrementar los gradientes con relación a la Fig. 20c. Además, la pérdida de permeabilidad asociada a la inyección contribuye a incrementar también los gradientes en las inmediaciones del túnel. La extensión de la zona plástica dependerá del peso relativo que tengan la disminución de permeabilidad originada por la inyección y el incremento de la resistencia de la zona tratada. En la Fig. 20d se indica la situación correspondiente a un predominio de los efectos de mejora resistente de la inyección. En este caso la zona plástica es reducida y queda confinada dentro del terreno inyectado. La solución es satisfactoria y además los caudales a evacuar serán pequeños.

| BENEFICIA LA ESTABILIDAD | PERJUDICA LA ESTABILIDAD |
|---|---|
| • El aumento de permeabilidad en la zona plástica ($h = 0$)<br>• Dejar drenada la zona plástica $(h \approx 0)$<br>• Altos valores de $p_\omega$ en la periferia del túnel (equivalente a impermeabilizar el túnel)<br>• Aumento de parámetros resistentes (inyección lechada de cemento) | • El aumento de gradientes de agua en la zona plástica<br>• Pequeños valores de $p_\omega$ en el contorno del túnel<br>• Disminución de la permeabilidad en las inmediaciones del túnel (inyección) |

Fig 19

Sin embargo, si predominan los efectos negativos de reducción de la permeabilidad o la zona tratada por la inyección es pequeña, la corona plástica puede afectar a toda la zona de inyección y se alcanza una situación pésima en cuanto a condiciones de estabilidad. Por último (Fig. 20f) si se inyecta el terreno y se evita todo drenaje (condición que puede ser difícil de asegurar, sobre todo en los frentes y en sus proximidades) la zona plástica adquirirá un pequeño desarrollo y las necesidades de sostenimiento serán asimismo reducidas (pero habrá, lógicamente, que considerar la presión de agua sobre el revestimiento).

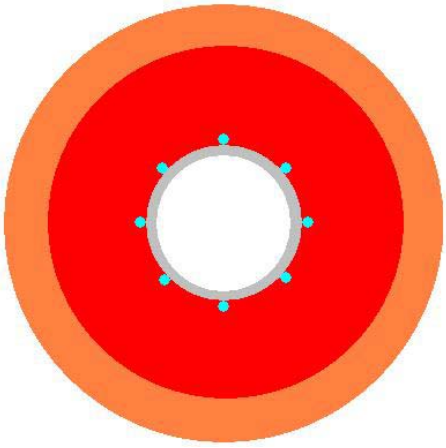


CASO a

- Túnel sin drenaje. Estanco
- Sin inyección

Cierto desarrollo de la zona plástica

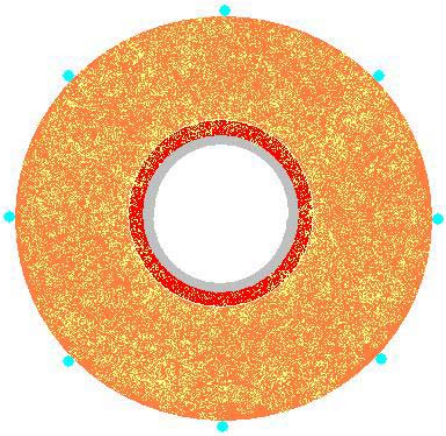
Fig. 20



CASO b

- Drenaje en túnel
- Sin inyección

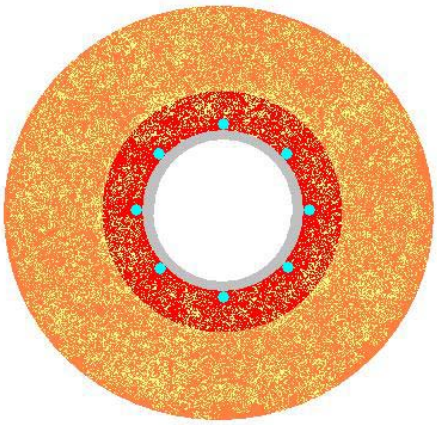
Más desarrollo de zona plástica
Más presión a igualdad de deformación



CASO c

- Drenaje en trasdós de inyección
- Inyección del macizo
- Túnel estanco

Mínimo desarrollo de zona plástica
Revestimiento poco tensionado
Posible: caudales importantes



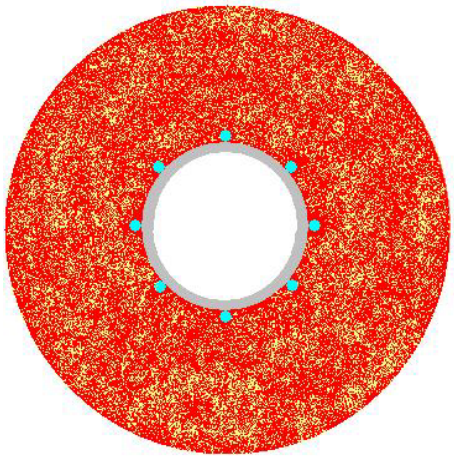
CASO d

- Inyección del macizo
- Drenaje del túnel

La extensión de la zona plástica depende del peso relativo de la pérdida de permeabilidad y de la ganancia de resistencia del terreno (si es pequeña => escaso empuje del revestimiento)

Caudales a evacuar pocos

Fig. 20 (Continuación)

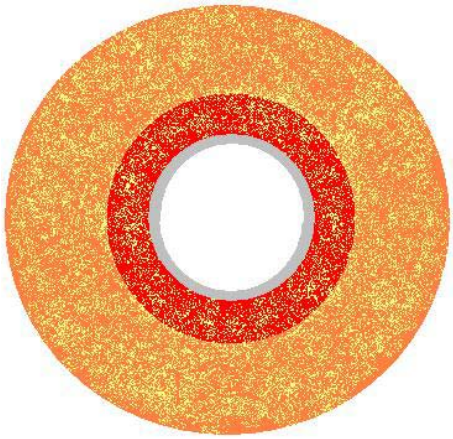


CASO e

- Inyección del macizo
- Drenaje en túnel
- La zona plástica se extiende a la zona inyectada

Fuertes tensiones sobre revestimiento (situación pésima)

Caudales a evacuar relativamente pequeños



CASO f

- Inyección del macizo
- Túnel estanco

Poco desarrollo de la zona plástica

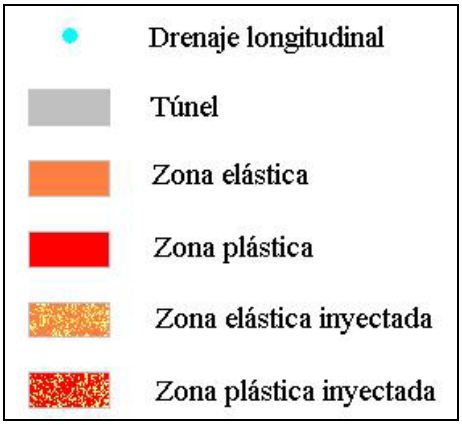
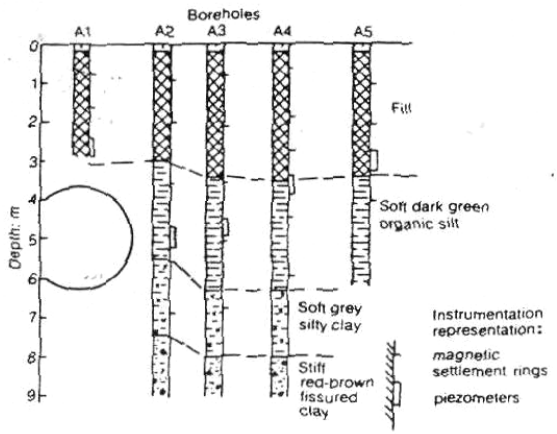
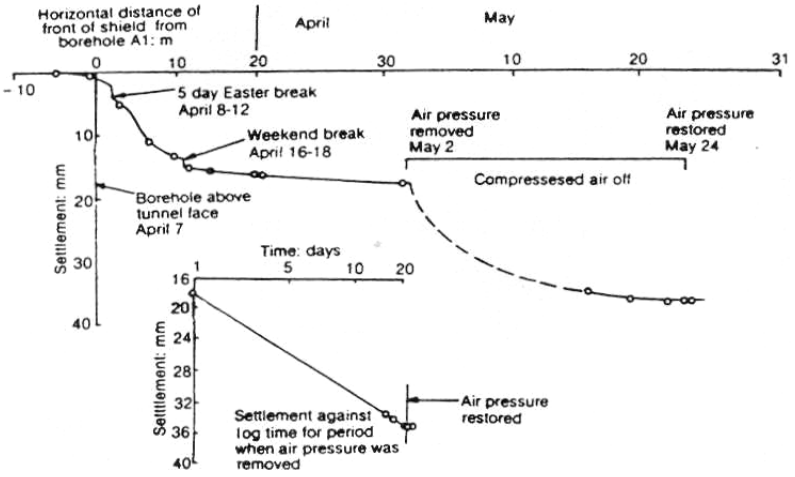



Fig. 20 (Continuación)

16. La excavación de un túnel provoca fenómenos acoplados de deformación y flujo más complejos que los expuestos hasta ahora. Es ilustrativa a este respecto la Fig. 21 que muestra los movimientos (Fig. 21 b, c) y presiones intersticiales (Fig. 21d) originadas por la excavación de un túnel mediante escudo y aire comprimido en arcilla aluvial (Fig. 21 a). Parte de los movimientos observados (en superficie) por efecto de la excavación corresponden a condiciones no drenadas (antes de eliminar la presión del aire) y fenómenos drenados a continuación (con la consiguiente extensión y profundización (Fig. 21 a) de la "cubeta" de asientos en superficie). En otras modalidades de perforación es más difícil separar ambos tipos de deformación y en general la construcción del túnel desencadena un proceso acoplado flujo-deformación.

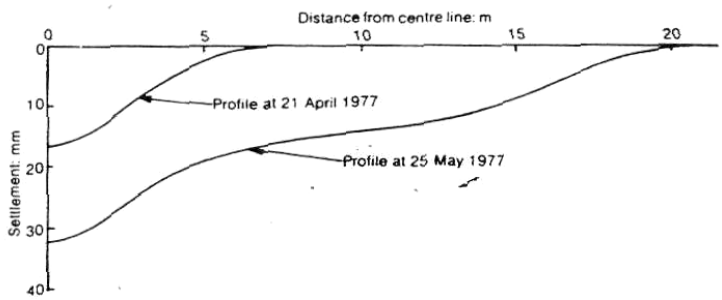



a) Sección instrumentada

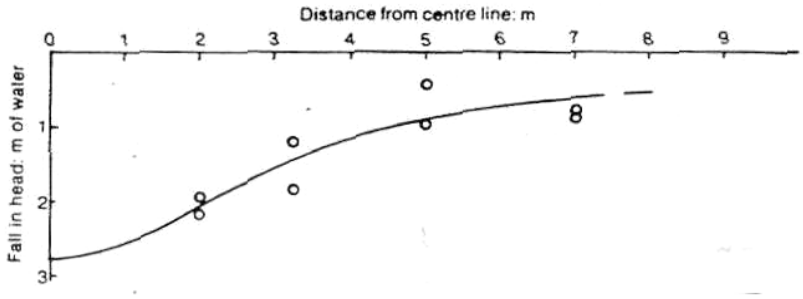



b) Valoración del asiento en superficie por encima de la clave

Fig. 21. Asiento no drenado y por consolidación (arcilla aluvial). (Glassop + Fermer, 1975)




c) Perfil transversal de asientos antes y después de quitar la presión de aire




d) Disminución de la presión intersticial en una sección perpendicular al túnel al quitar la presión de aire

Fig. 21 (Cont). Asiento no drenado y por consolidación (arcilla aluvial). (Glassop + Fermer, 1975)

17. Se han descrito procedimientos de análisis rigurosos flujo-deformación de la excavación de un túnel utilizando métodos de elementos finitos. Algunos ejemplos recientes se han reunido en las Figs. 22 y 23.

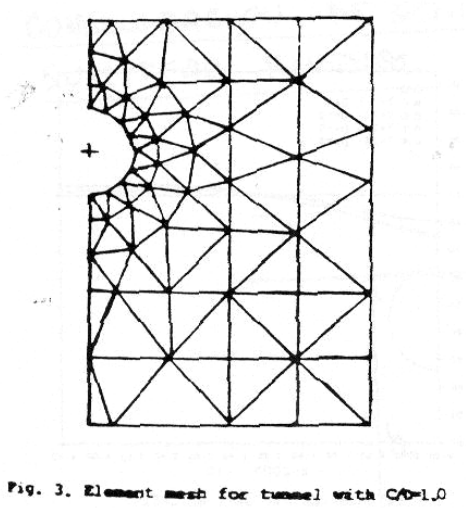



Fig. 22. Cam-clay mod + consolidación (Seneviratne + Gunn, 1985)

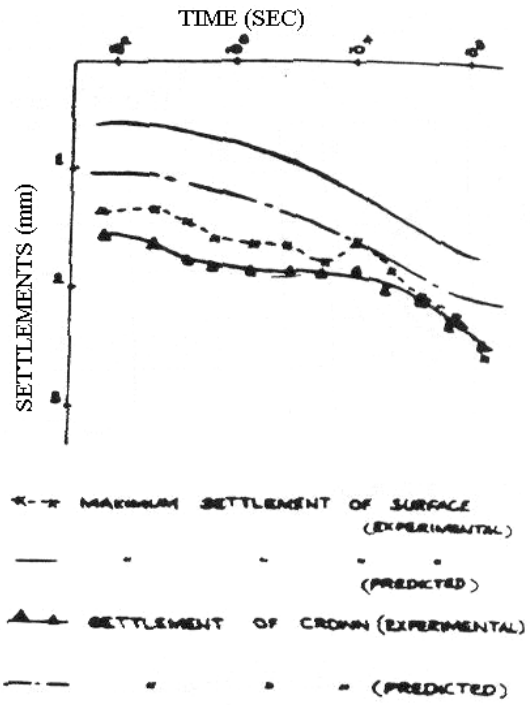



Fig. 5. Predicted and measured variations of settlements with consolidation time (Test 2, C/D = 1.40)

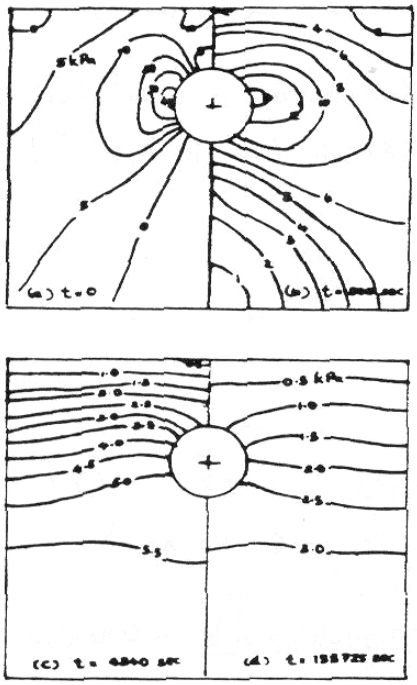


Fig. 6. Variation of pore pressure with consolidation finite element analysis C/D = 1.0

Fig. 22 (Cont.). Cam-clay mod + consolidación (Seneviratne + Gunn, 1985)

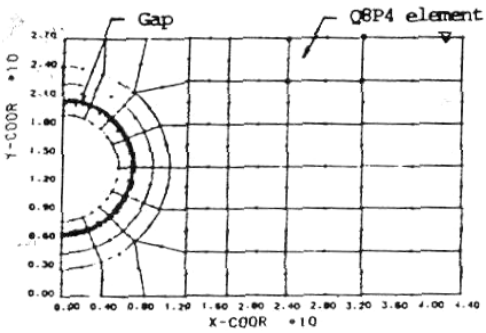
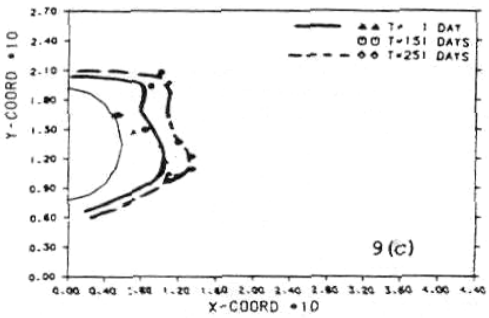
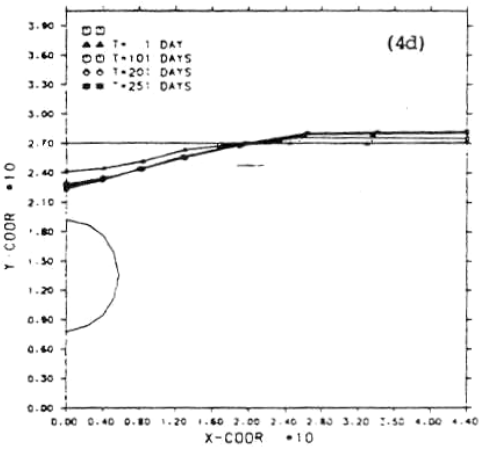



Fig. 3 FEM mesh




STRESS DISTRIBUTION (W/ GAP, W/ CREEP)




DEFORMATION (W/ GAP, W/ CREEP)

Fig. 23. Cam-clay mod. + consolidación secundaria (Singh-Mitchell)

Liang (1988)
(ICONMIG. Innsbruch)

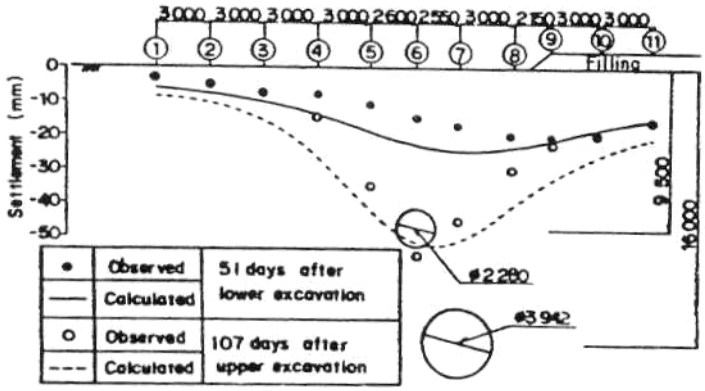
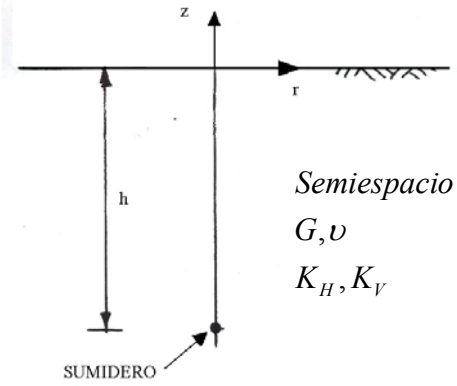



Fig. 23 (Cont.). Sekiguchi-Ohita + consolidación (Ohta et al, 1985; ICONMIG. Nagoya)

18. Recientemente se ha desarrollado también una solución analítica para el problema acoplado de consolidación inducido por un sumidero puntual (Figs. 24 y 25). Esta solución puede ser de interés como primera aproximación para evaluar los efectos de la consolidación inducida por la excavación de un túnel y especialmente, para estimar los movimientos inducidos por sistemas de drenaje. En la Fig. 25 puede observarse como se incrementa y se extienden los asientos en superficie originados por un sumidero puntual con el transcurso del tiempo (resultados cualitativamente similares a los presentados en la Fig. 21c) y asimismo el efecto de la anisotropía de la permeabilidad. Esta solución teórica puede permitir el desarrollo de programas de elementos de contorno para resolver problemas con geometrías complejas.



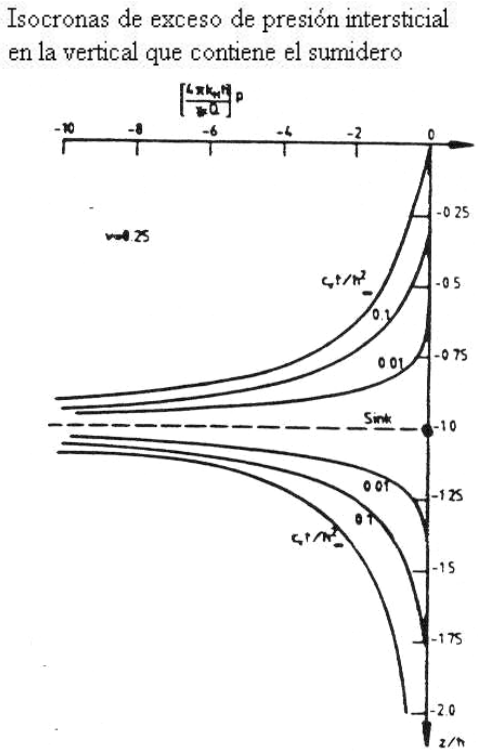
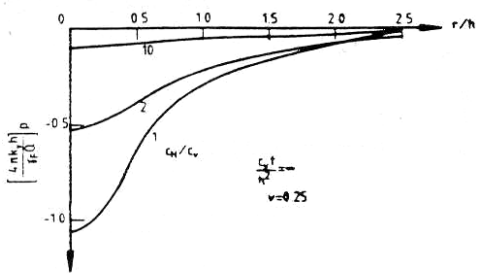




Fig. 24. Consolidación de semiespacio elástico in-ducida por un sumidero puntual. Permeabilidad a-nisotrópica (Booker + Carter, 1987)




- Exceso de presión intersticial en el plano z = -0.5 h en t = ∞

ASIENTO EN SUPERFICIE

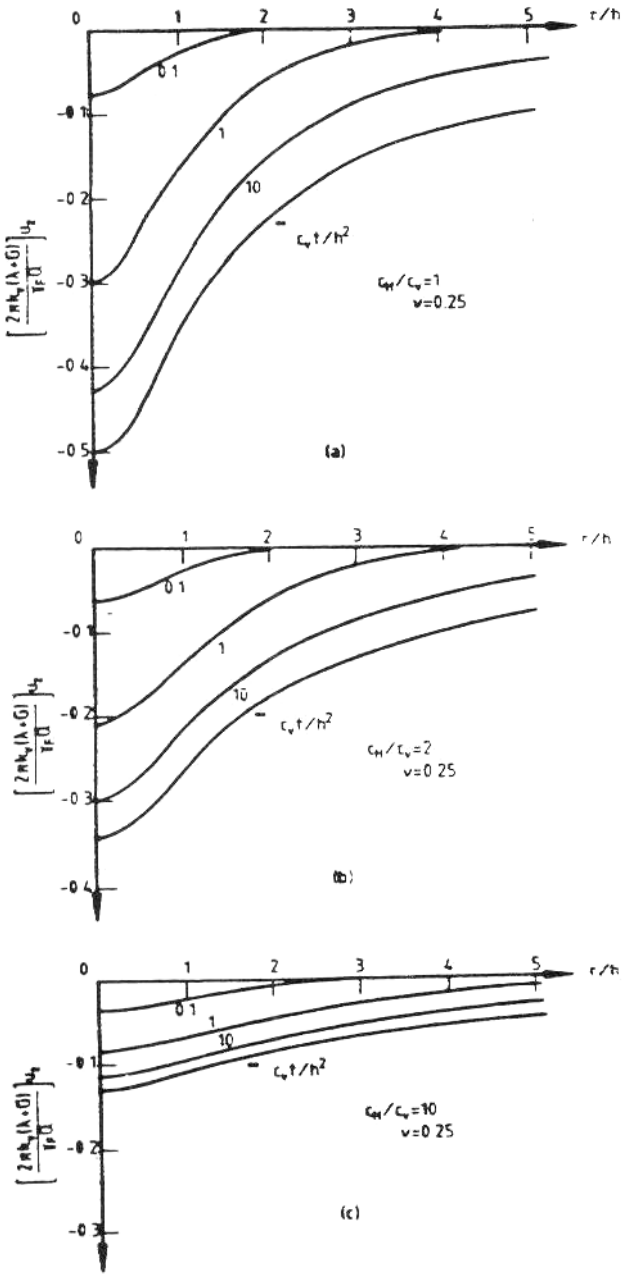



Fig. 25

## PROTECCIÓN FRENTE AL AGUA DURANTE LA CONSTRUCCIÓN

19. Es común la utilización de inyecciones desde el exterior (Fig. 26 y 27, en este último caso acompañada de un "paraguas" de "jet grouting") o bien desde el interior del propio túnel. En general, en terrenos de mala calidad saturados, se combinan procedimientos de drenaje e inyección desde el propio túnel. Es frecuente que en circunstancias difíciles se dispongan taladros de longitud apreciable (30 m – 100 m), perforados desde el frente, para detectar presiones o caudales elevados y permitir el drenaje (Fig. 28b). La combinación de inyecciones y drenaje que aparece en la Fig. 28 a es similar en su concepción a la Fig. 20c, discutida anteriormente.

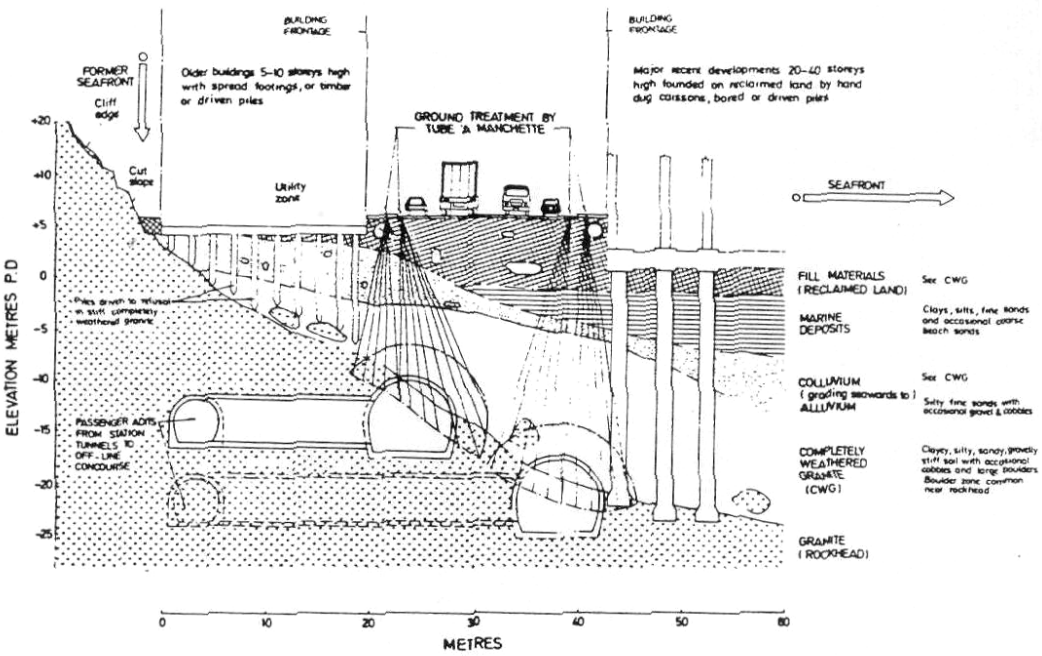



Fig. 26.Tratamiento de túneles en Hong-Kong (Mc Feath Smith + Haswell, 1985)

Un caso interesante de drenaje intensivo mediante aplicación de vacío, de granitos descompuestos saturados de baja permeabilidad aparece en la Fig. 29. Este procedimiento fue la alternativa, finalmente ejecutada, a un método por congelación inicialmente proyectado.

Los niveles piezométricos se pueden reducir también desde el exterior utilizando pozos de bombeos. En ocasiones (Fig. 30) es necesario completar este drenaje exterior con drenajes suplementarios desde el propio túnel.

En grandes obras se ha recurrido a túneles de drenaje auxiliares. El túnel de Seikan, ampliamente descrito en muchas referencias, es un ejemplo de este concepto (Fig. 31).

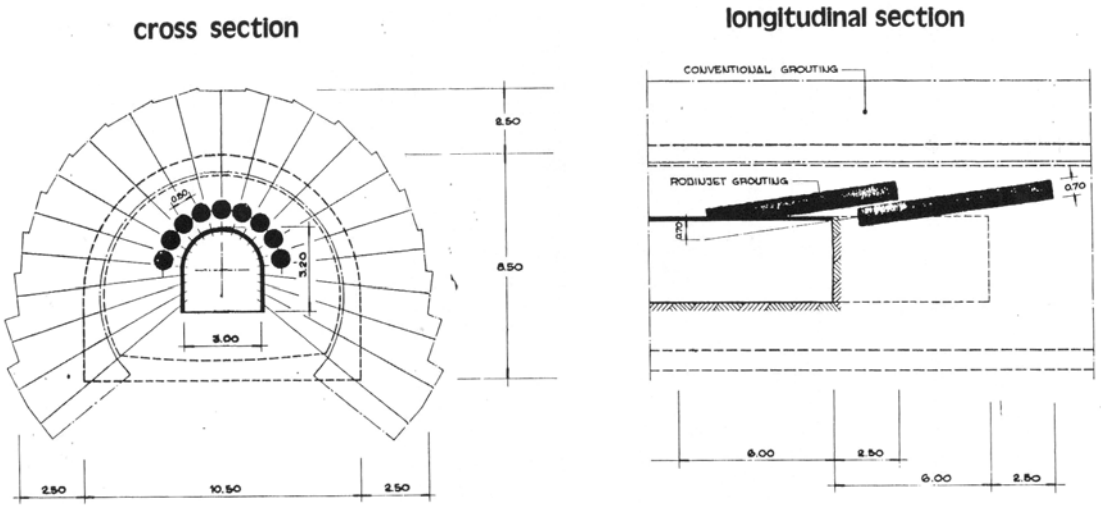
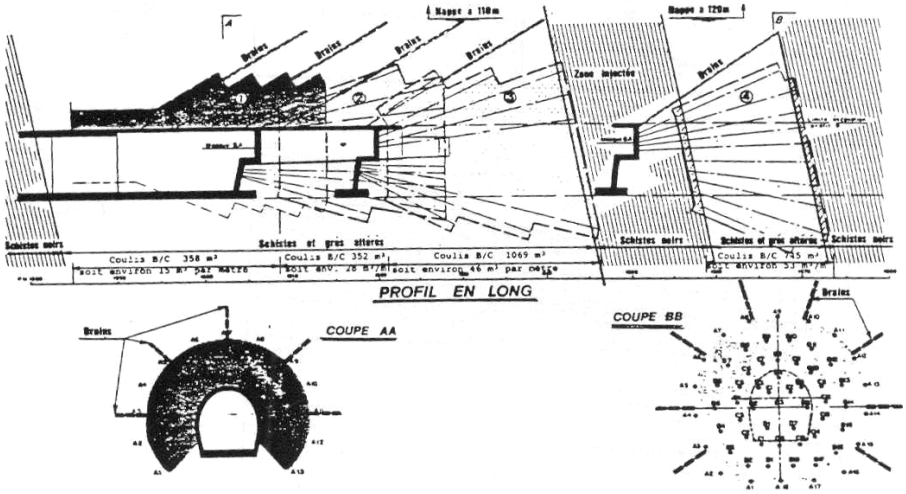
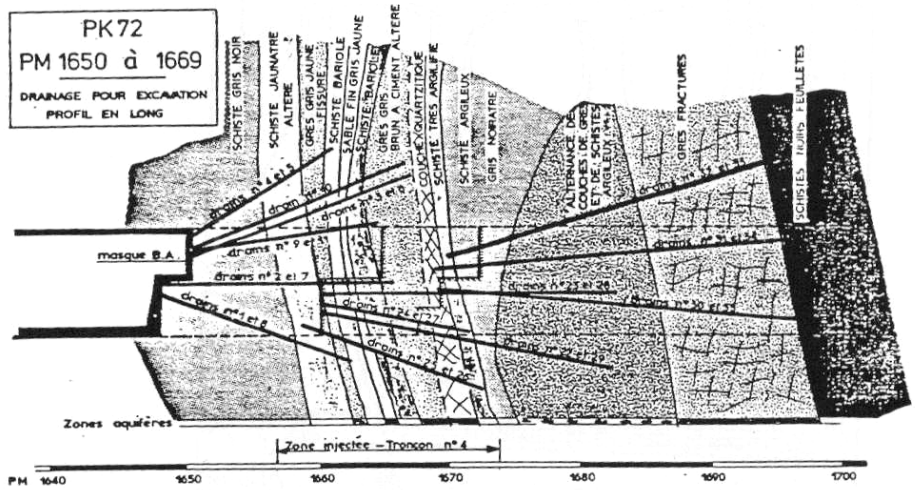



Fig. 27. Metro de Milán. Esquema de tratamiento (Tornaghi + Cippo, 1985)

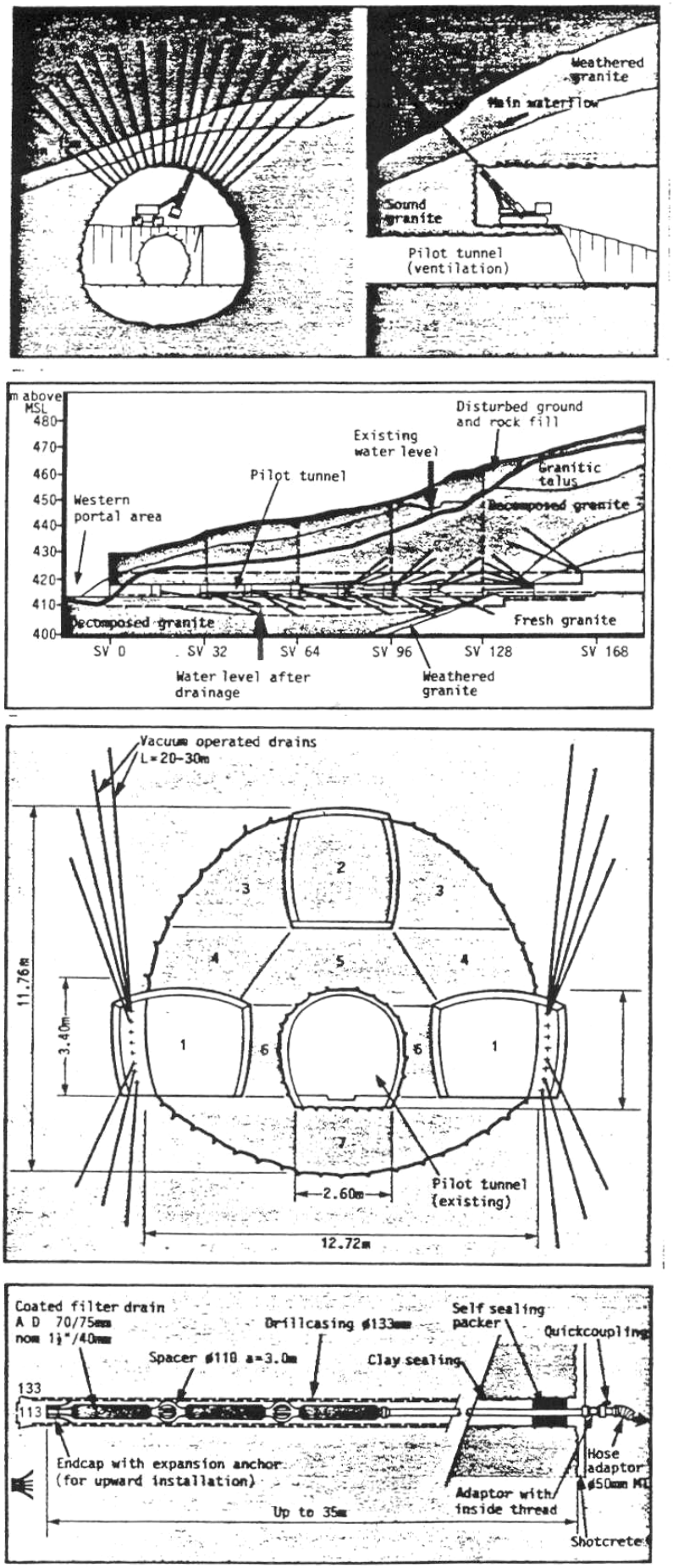



a. TRATAMIENTOS EN EL PASO DE UNA FALLA IMPORTANTE




b. PERFIL HIDROGEOLÓGICO Y ESQUEMA DE DRENAJE PREVIO A LA EXCAVACIÓN

Fig. 28. Túnel Long, Congo-Océano, A = 40 $m^2$ y L = 4.6 Km (Lepetit + Chapeau, 1985)




$K_{granit.desc} \approx 10^{-8} m/s$

<u>Drenes:</u> 3000 m lineales; long: 20-25 metros

$Q \approx 10 - 15 m^3/s$

Fig. 29. Drenaje en el túnel de Du Toitskloo, Sudáfrica (Bütter, 1987)

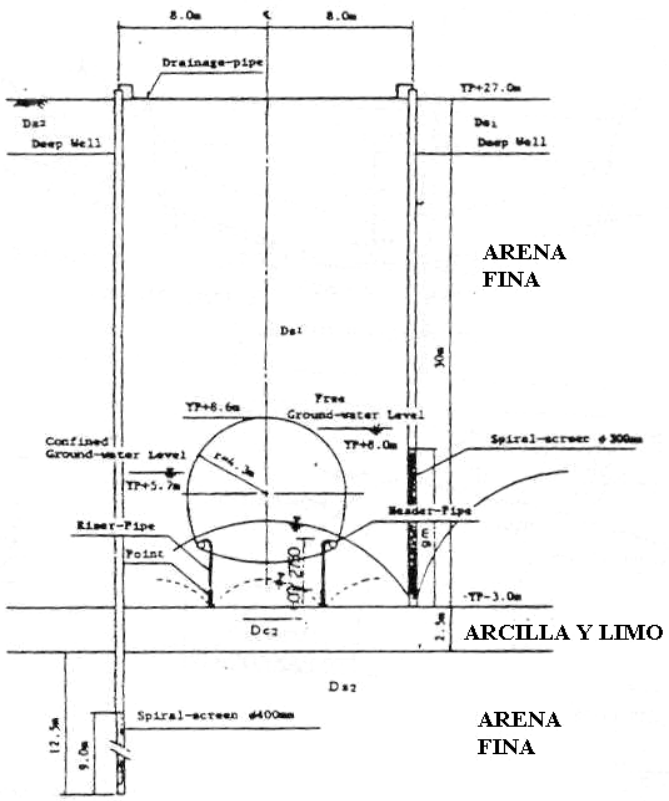



Fig. 30. Túnel de Kokubu (Tokyo). Esquema de drenaje (Fujimori et al, 1985)

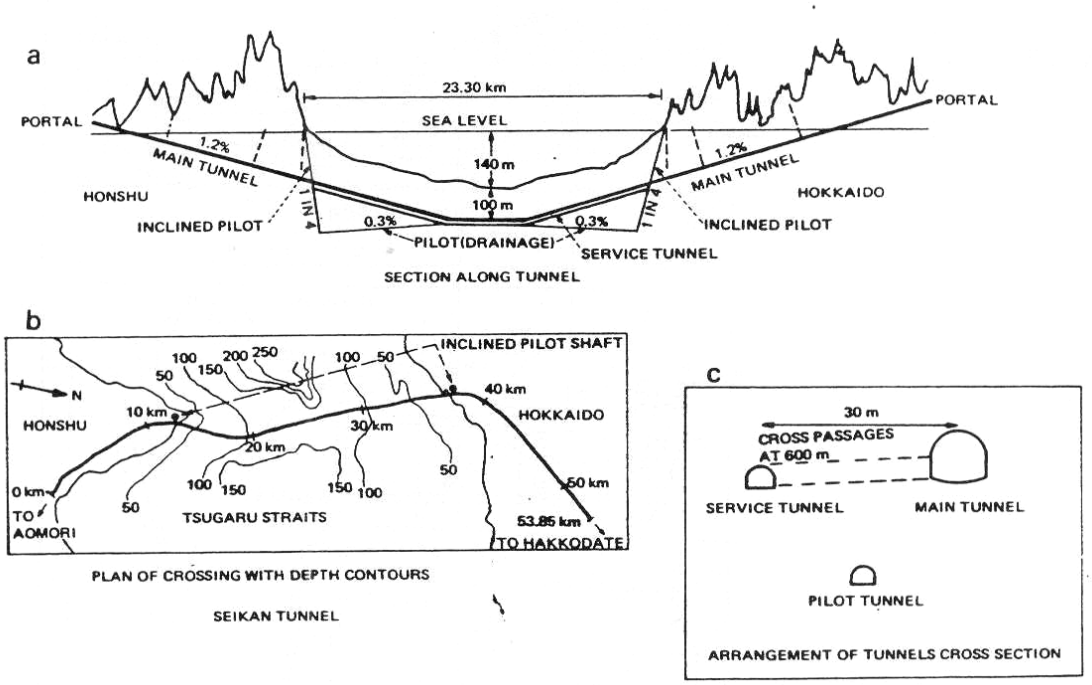



Fig. 31. Túnel de Seikan (Megaw + Barlett, 1981)

## PROTECCIÓN FRENTE AL AGUA DURANTE LA EXPLOTACIÓN

20. Se emplean técnicas de drenaje y de impermeabilización. Con el drenaje se pretende además reducir a cero la presión de agua, generalmente en el trasdós del revestimiento. Para ello el agua debe ser conducida (drenada) y evacuada por algún procedimiento. En la Fig. 32 se ha dibujado un esquema del sistema de drenaje utilizado en algunos túneles de España (túneles en la autopista Campomanes-León). El drenaje interior de la calzada puede utilizar los mismos sistemas de evacuación que se diseñan para el drenaje del túnel propiamente dicho. En el caso dibujado el drenaje está confiado a un material de alta porosidad situado entre el revestimiento definitivo y el macizo rocoso o terreno, ya sostenido. La descarga del agua recogida en el dren de gravas de base se efectúa al amparo de juntas abiertas que coinciden con juntas de construcción. En estas juntas abiertas pueden tener origen otros sistemas adicionales de drenaje (taladros-dren, rozas, etc... ).

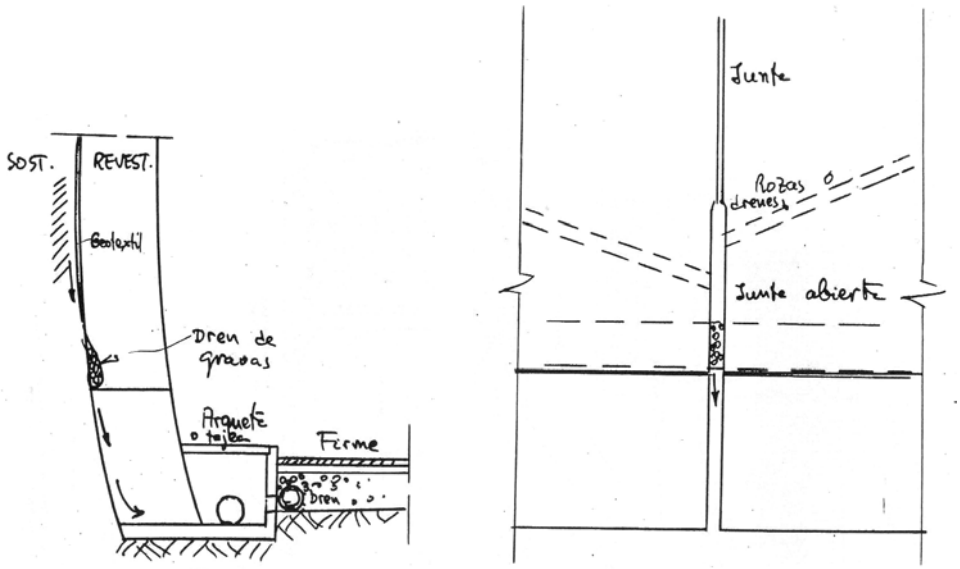
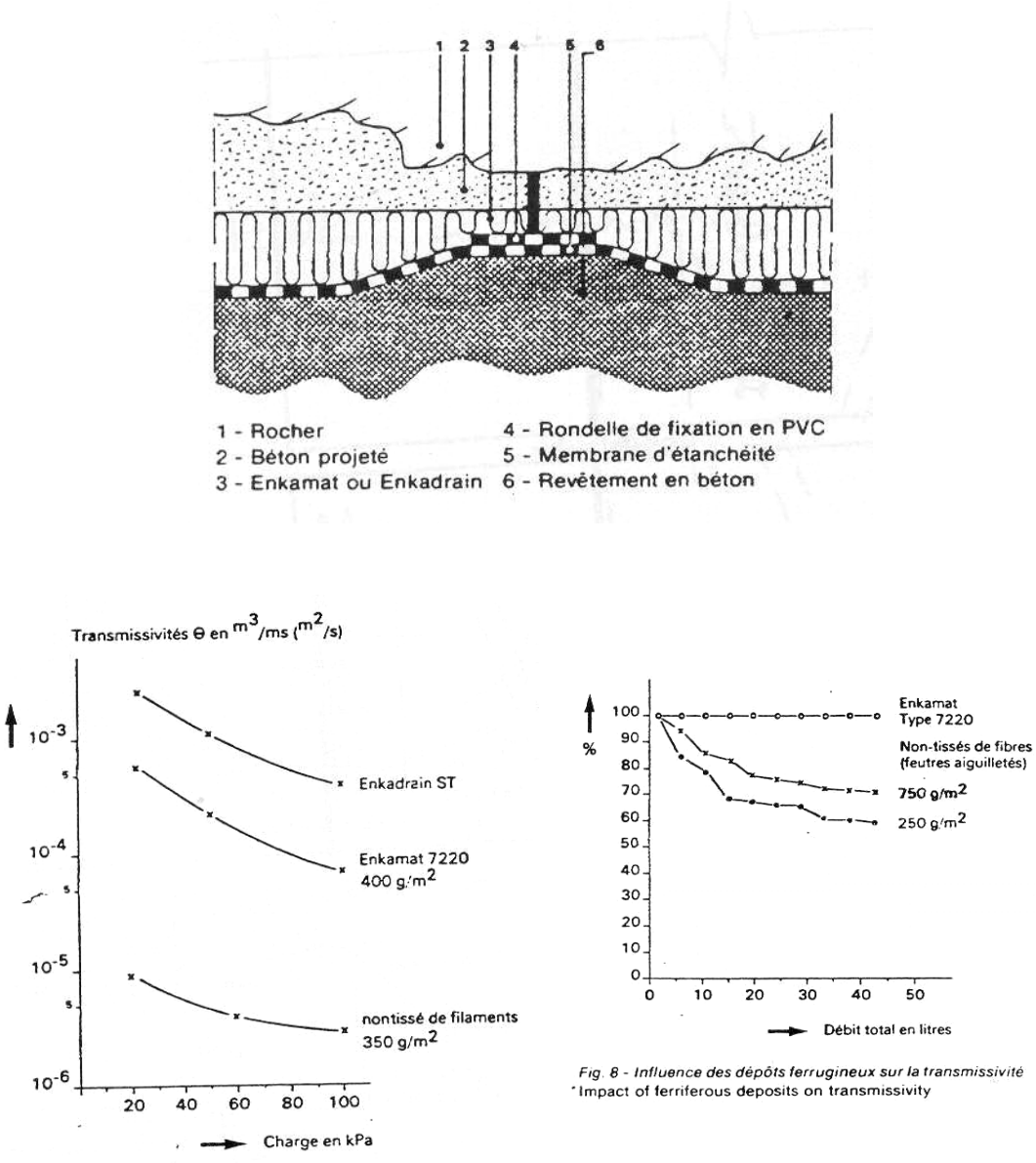



Fig. 32. Esquema de sistema de drenaje utilizado en túneles de la autopista Campomanes-León

En construcciones recientes, el drenaje suele ir asociado a la impermeabilización. Con frecuencia, son láminas de PVC situadas en el extradós del revestimiento las que aseguran la estanqueidad del túnel. Estas láminas asientan sobre mallas permeables que además de asegurar el drenaje proporcionan una adecuada regularización de la superficie irregular del sostenimiento (Fig. 33 a). Debe tenerse en cuenta en el proyecto la pérdida de permeabilidad originada por la presión ejercida por el terreno (Fig. 33b) y la influencia de precipitaciones y depósitos transportados por el agua de filtración (Fig. 33). Un ejemplo de disposición de la membrana de impermeabilización se ha recogido en la Fig. 34.

No son comunes, en diferentes países, las prácticas de impermeabilización de túneles. Algunos suelen exigir la impermeabilización integral de toda la longitud del túnel. El otros, se drena y/o impermeabiliza determinados tramos con problemas concretos. Tampoco es universal la impermeabilización mediante membrana en el trasdós del

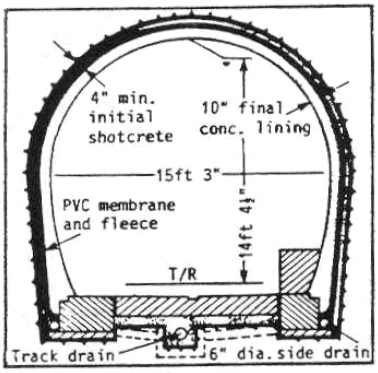
revestimiento. A veces la impermeabilización se confía a un revestimiento secundario, interior al revestimiento (o sostenimiento) principal. Este revestimiento secundario puede cumplir además otras funciones (incremento de luminosidad, estética). Se han reunido unos ejemplos en la Fig. 35.




Figs. 33a, 33b y 33 c. Drenaje (Malla tridimensional) e Impermeabilización (Membrana impermeable PVC); Berkhout et al, 1987

21. Si el túnel se construye mediante dovelas prefabricadas (sistema que no necesariamente se utiliza en terrenos de baja calidad) se consigue una impermeabilización efectiva mediante materiales de sellado comprimidos entre las juntas longitudinales y transversales de las dovelas (Fig. 36 a). Más recientemente se

han utilizado también inyecciones de bentonita/cemento, cemento con látex, resinas, en conductos de sellado limitados por las propias dovelas prefabricadas. En estos sistemas mediante dovelas una primera barrera al paso del agua lo constituye con frecuencia la inyección de trasdós. La experiencia demuestra sin embargo que estos túneles actúan también como drenes de los acuíferos que atraviesan.



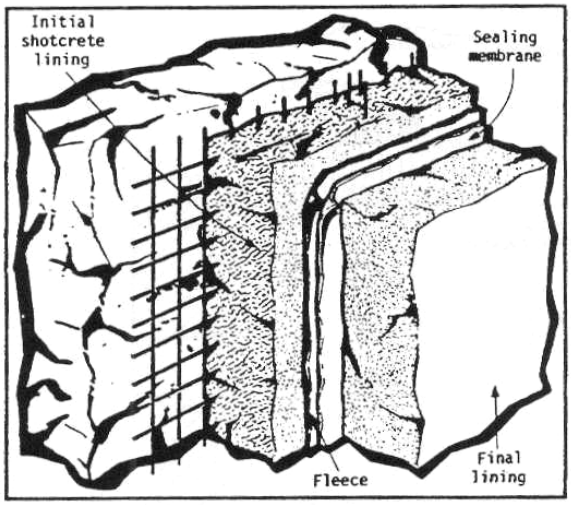
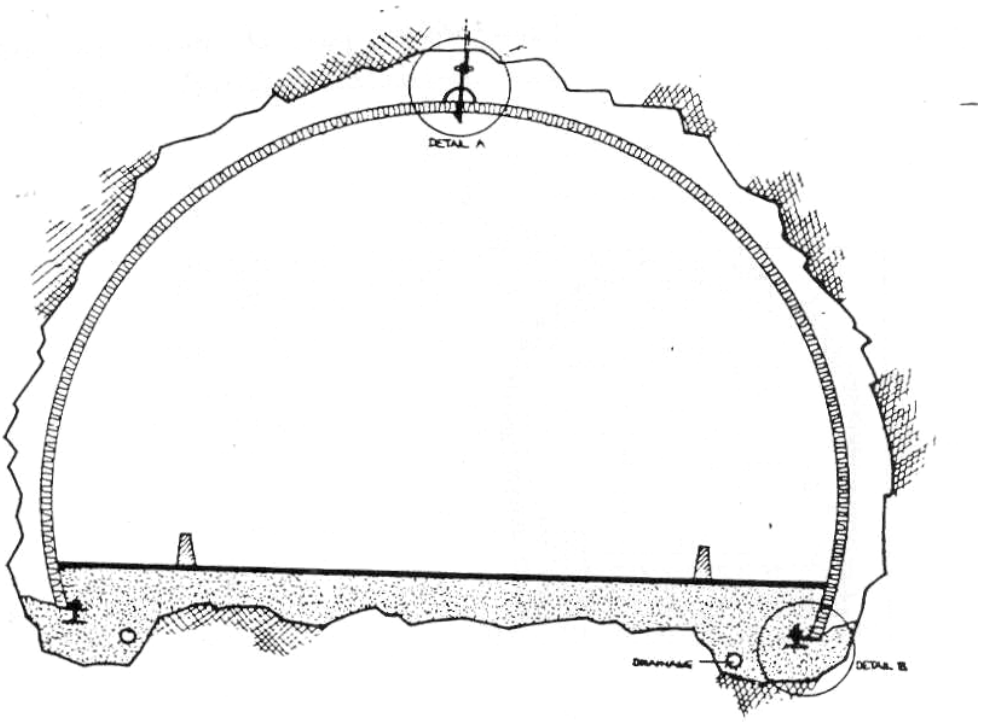
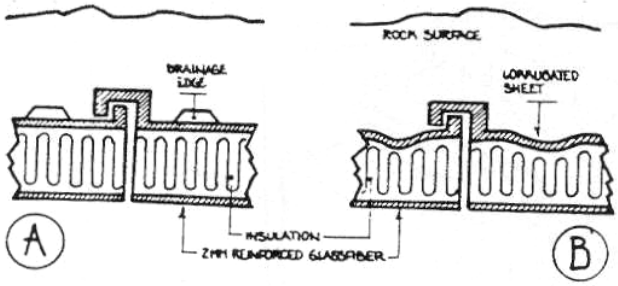



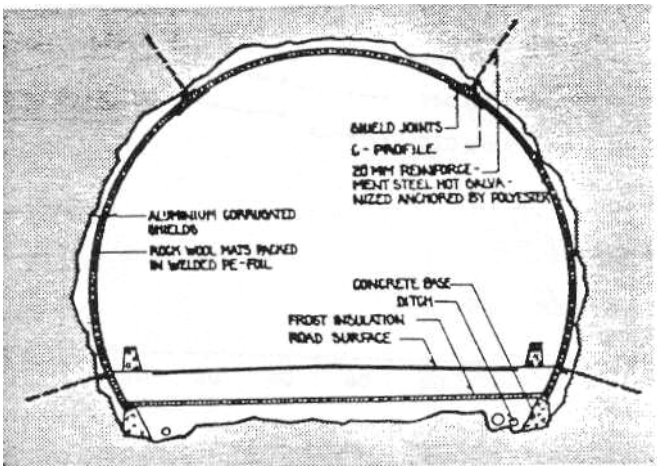

Fig. 34. Metro de Washington. Impermeabilización (Martin, 1987)
*Premio ASCE para el mejor proyecto en Ingeniería Civil, 1987*

22. En la mayoría de los túneles el agua drenada es evacuada mediante conductos hacia el exterior siguiendo las pendientes naturales del trazado. En otras ocasiones y singularmente en el caso de túneles subacuáticos es necesario prever estaciones interiores de bombeo pues el trazado supone la existencia de puntos interiores de acumulación del agua drenada.



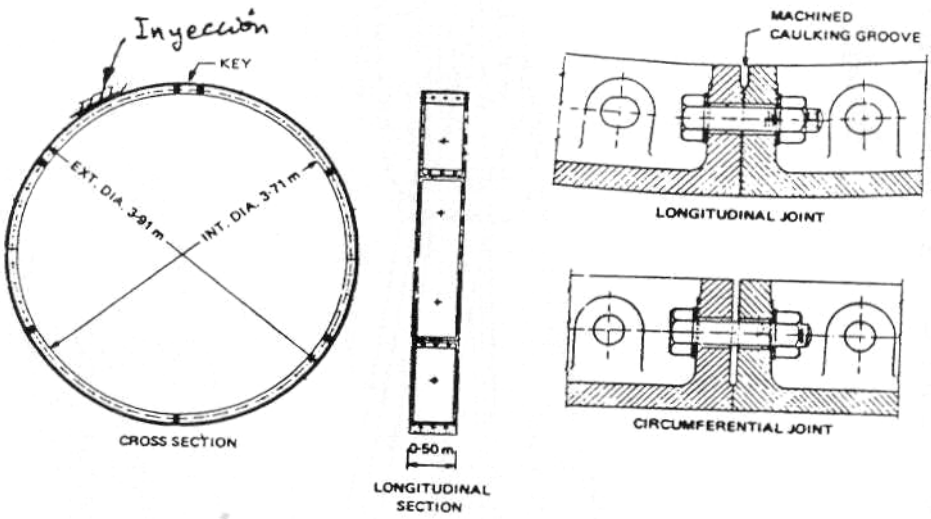




ESTRUCTURA SANDWICH DE FIBRA DE
VIDRIO Y RESINA DE POLIESTER




PLANCHAS DE ALUMINIO CORRUGADAS

Fig. 35. Revestimiento secundario de protección frente al agua en Noruega
(Krokeborg + Pedersen, 80's)




CEMENTO DE ASBESTOS (FRÁGIL)
PLOMO (CARO)

Fig. 36a. Impermeabilización en túneles construidos mediante dovelas (Megaw + Bartlett, 1981)

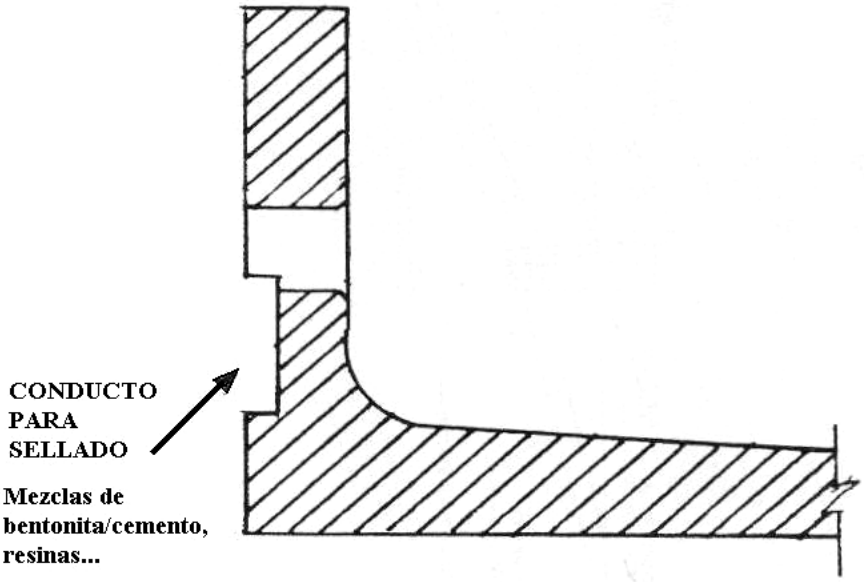



Fig. 36b. Impermeabilización en túneles construidos mediante dovelas (Lyons, 1979)

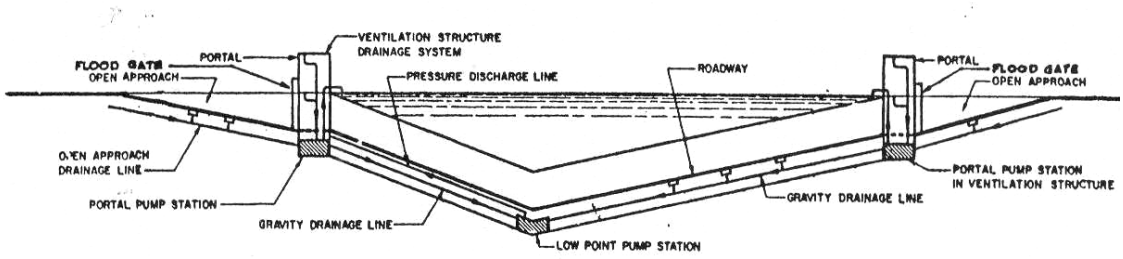



Fig. 37. Esquema de drenaje en un túnel subacuático (Bendelius, 1982)

## REFERENCIAS

Atkinson, J.M. and R.J. Mair (1983) "Loads on leaking and water tight tunnel linings, sewers and buried pipes due to groundwater". Technical Note. Geotechnique Vol. 33, nº 3, 341-343.

Bendelius, A.G. (1982) "Drainage Systems" in "Tunnel Engineering Handbook". Ed. By J.O. Bickel and T.R. Kuesel. Van Nostrand.

Berkhout, H.C., W. Herveling and J.P Portail (1987) "Système de drainage in tunnel par traillis synthétique tridimensionnel". Tunnels et Ouvrages Souterraines. AFETES, nº 80, 78-82.

Booker, J.R. and J.P. Carter (1987) "Elastic consodilation around a sink embedded in a half-space with anisotropic permeability". Int. J. Numer. Anal. Methods Geomech. 11, 1, 61-78.

Brown, E.T., J.W. Bray, B. Ladanyi and E. Hoek (1983) "Ground response curves for rock tunnels". Jnl. Of Geotechnical Engineering, ASCE, 109, 1, 15-39.

Brume, J.E., A. Hellgren and S. Böckström (1980) "Grouting of tunnels in order to avoid detrimental groundwater lowering". Rockstore 80, Oxford 89-95.

Büttner, J.H. (1987) "Vacuum dewatering puts freezing out in the cold". Tunnels and Tunneling, 19, 7, 20-23.

Custodio, E. y M.R. Llamas (1976) "Hidrología Subterránea". Omega. Barcelona.

Dodds, R.K. (1982) "Preliminary investigations" in "Tunnel Engineering Handbook", Ed. By J.O. Bickel and T.R. Kuesel. Van Nostrand. 11-34.

Fujimori, T., C. Uchiyama, H. Kunimi and H. Takasaki (1985) "Use of NATM in soft ground near Tokyo, Japan". Tunnelling'85. Proc. 4th Int. Symp. Inst. Min. Met. London. 93-102.

Gioda, G. and A. Desideri (1988) "Some numerical techniques for free surface seepage analysis". Proc. 6th Int. Conf. Num. Methods Geomech., Innsbruck, Vol. 1, 71-84.

Glossop, J.H. and I.W. Farmer (1979) "Settlement associated with removal of compressed air pressure during tunnelling in alluvial clay". Geotechnique, Vol 29, nº 1, 67-72.

Goodman, R.E., D.G. Moya, A van Schalwyk and I. Javandel (1965) "Ground water inflows during tunnel driving". Eng. Geol. 39-56.

Ishizaki, A. (1979) "Examples and research aspect for dearth of water caused by railway tunnelling in Japan" in "Tunnelling under difficult conditions". Proc. Int. Tunnel Symp. Et by I. Kitamura. 187-192.

Jansson, G. (1979) "Problems associated with heavy water leakage during construction of large area tunnels in granite, limestone and chalk" in "Tunnelling under difficult condition". Proc. Int. Tunnel Symp. Ed by I. Kitamura. 187-192.

Jiménez Salas, J.A. (1982) "Conclusiones Finales. Simposio sobre uso industrial del subsuelo". Madrid. T-2. Ponencias y Discusiones. 127-143.

Jiménez Salas, J.A. y A.A. Serrano (1984) "Condiciones geotécnicas del túnel bajo el Estrecho de Gibraltar". Revista de Obras Públicas. Julio – Agosto. 553-553.

Krokeborg. J. And K.B. Pedersen (1985) "Low-cost protection against water and frost in road tunnels". Tunnelling '85. Proc. 4th Int. Symp. Inst. Min. Met. London. 165-169.

Lembo Fazio, A. and R. Ribacchi (1984) "Influence of seepage on tunnel stability", in Design and Perfoman of Underground Excavations. ISRM Symp. Cambridge. Ed. By E.T. Brown and J.A. Hudson, 173-182.

Lepetit, P. and C. Chapeau (1985) "Les méthodes de creusement utilisées dans des terrains boulants au Tunnel Long du chemin de fer Congo-Ocean". Le creusement des Tunnels en Terrains Meubles et Aquifères. Comptes – rendus des journees d'etudes internationales. Lyon. 125-134.

Liang, R.Y.K. (1988) "Numerical analysis of tunnel behaviour in creep – susceptible clays". Proc. 6th Int. Conf. Num. Methods Geomech. Innsbruck. Vol.3, 1575-1584.

Lyons, A.C. (1979) "The design and development of segmental tunnel linings in the UK" in "Tunnelling under difficult conditions". Proc. Int. Tunnel Symp. Ed. By I. Kitamura 55-60.

Martin, D. (1987) "Dry run for Washington metro gives NATM an American boost". Tunnels and Tunnelling, 19, 5, 16-21.

McFeat – Smith, I., and C.K. Haswell (1985) "Preliminary studies for tunnel projects in Hong-Kong". Tunnelling'85. Proc. 4th Int. Symp. Inst. Min. Met. London. 301-308.

Megaw, T.M. and J.V. Bartlett (1981) "Tunnels. Planning, Design, Construction". Vol. 1. Ellis Horwood.

Muir Wood, A. and C.J. Kirkland (1985) "Tunnelling hazards and risk-sharing". Tunnelling '85. Proc. 4th Int. Symp. Inst. Min. Met. London. 295-300

Ohta, H., H. Kitamura, M. Itoh and M. Katsumata (1985) "Ground movement due to advance of two shield tunnels parallel in vertical plane". Proc. 5th Int. Conf. Numer. Methods Geomech. Nagoya. 1161-1166

Oteo, C.S. (1982) "Presiones de agua sobre el túnel en el caso de solución drenada". Coloquio Internacional sobre la factibilidad de una comunicación fija a través del Estrecho de Gibraltar. Madrid. Secegsa. 719-726.

Samaniego, J.A. and S.D. Priest (1984) "The prediction of water flows through discontinuity networks into underground excavation" in Design and Performance of Underground Excavation. ISRM Symp. Cambridge. Ed. By E.T. Brown and J.A. Hudson. 157-164.

Seneviratne, H.N. and M.J. Gunn (1985) "Predicted and observed time-dependent deformations around shallow model tunnels in soft clay". Proc. 5th Int. Conf. Numer. Methods Geomech. Nagoya. 1135-1140.

Swann, L.H., C.J. Day and M.A. Lepper (1985) "Grouting and Tunnelling in Thames Gravel – a case history". Tunnelling '85. Proc. 4th Int. Symp. Inst. Min. Met. London. 285-291.

Tornaghi, R. and A. Perelli Cippo (1985) "Soil improvement by jet grouting for the solution of tunnelling problems". Tunnelling '85. Proc. 4th Int. Symp. Inst. Min. Met. London.265-276

Ward, W.H. and M.J. Pender (1981) "Tunnelling in soft ground. General Report" Proc. 10th Int. Conf. S. Mech. Found Engng., Stockholm, Vol. 4, 261-275.