

# Condiciones geotécnicas del túnel bajo el Estrecho de Gibraltar

Por JOSE A. JIMENEZ SALAS  
y ALCIBIADES A. SERRANO

*La solución túnel para el cruce del Estrecho de Gibraltar presenta una serie de interesantes problemas técnicos cuyas posibles soluciones se analizan en el artículo: presiones sobre el revestimiento, forma de la sección, forma de excavación, hinchamiento del terreno —sobre cuyo óptimo se presenta una teoría— y su control.*

## 1. INTRODUCCION

### Condiciones generales

Ante el proyecto de túnel a través del Estrecho de Gibraltar se presentan muchas cuestiones de carácter geológico y geotécnico no suficientemente aclaradas y que son de capital importancia para su desarrollo.

De una manera sumaria podemos indicar la siguiente relación de temas oscuros:

- a) De carácter fisiográfico y/o geomorfológico:
  - Batimetría precisa de toda la zona que puede afectar al enlace.
  - Morfología del fondo marino.
- b) De carácter geológico:
  - Tectónica general del Estrecho.
  - Distribución y tipo de los accidentes geológicos.
  - Litoestratigrafía de la zona.
- c) De carácter geotécnico:
  - Propiedades geotécnicas de los materiales del sustrato y de los accidentes geológicos.
  - Estado tensional primario.

Las estrictas condiciones batimétricas del umbral del Estrecho limitan fuertemente la ubicación del túnel. Por ello el área directamente afectada por el proyecto es relativamente pe-

queña: en la parte española el arranque de la obra estaría entre las ensenadas de Bolonia y Valdevaqueros; en la costa marroquí la llegada debe estar entre la ciudad de Tanger y el oued Lediane (1).

Pese a esta limitación de espacio la zona del Estrecho tiene una complejidad geológica extraordinaria.

El proyecto se desarrolla en el dominio de los «flyschs» alóctonos y en el dominio intrarrifeño (margas de la unidad Tanger y su equivalente español del Almarchal). Las formaciones de los «flyschs alóctonos» son muy variadas y no responden siempre a la idea que en sentido geotécnico se suele dar a la palabra «flyschs»: alternancia rítmica de estratos duros y blandos. Existen también importantes paquetes de arcillas, conglomerados, calcarenitas y areniscas.

Las características geotécnicas de los «flyschs», en conjunto, parecen aceptables, aunque son de prever problemas locales controlables (accidentes tectónicos, base de los mantos, etcétera).

Los «flyschs», con tramos algo permeables por porosidad (areniscas y conglomerados) y otros por fisuración (calizas y margo-calizas), junto con una acusada tectonicidad, podrían presentar una permeabilidad digna de tenerse en cuenta en áreas localizadas a pesar de los

(1) Didon y otros (1982): «Geología del Estrecho de Gibraltar», SECEGESA, Madrid.

tramos arcillosos interestratificados, sobre todo considerando que estarán soportando una carga hidráulica de hasta 300 metros.

Las formaciones margosas del dominio intrarrifeño se presentan dada su morfología muy semejante a otras (la argilla scagliosa) de acusada expansividad.

La gran profundidad del Estrecho, aún en la zona del umbral, del orden de los 300 m. hace que este túnel haya de ser considerado como muy singular. La carga de agua es muy superior a la montera, y esa circunstancia obliga a estudiar con mucha atención todos los fenómenos ligados con el proceso de filtración.

En el caso de un túnel sin drenaje la carga de agua es soportada por el revestimiento. Si el túnel está drenado esa carga gravita sobre el terreno que lo rodea, a través de las fuerzas máxicas de filtración, pero a su vez esas fuerzas de filtración desencadenan un proceso tensodeformacional viscoelastoplástico que a lo largo afecta también al revestimiento.

Estas consideraciones de carácter general, así como las características de permeabilidad de los «fyschs», que se han apuntado anteriormente, hacen necesario un análisis detallado del proceso de filtración.

La formación intrarrifeña (Unidades de Tanger y del Almarchal) se presentan como unas margas muy preconsolidadas y muy tectonizadas.

Al abrirse la excavación del túnel van a ser sometidos a una gran decompresión. Toda arcilla en estas condiciones, aún cuando no haya sido calificada como expansiva, da lugar a entumecimientos importantes. En este caso el fenómeno puede ser más acusado aún, ya que aparentemente estas margas se empiezan a mostrar como de características expansivas.

En los sondeos los testigos muchas veces salen en forma de rodajas, los ensayos dan límites líquidos elevados, así como presiones de hinchamiento altas, etcétera.

A nuestro entender el tema de la expansividad puede tener también gran trascendencia para el proyecto del túnel bajo el Estrecho de Gibraltar.

Así pues, en esta comunicación, se analizarán los procesos tensodeformacionales ligados a la filtración, así como a la expansividad, ya que pueden ser los condicionantes de carácter geotécnico más importantes que se presenten en el proyecto de este túnel.

## 2. ANALISIS DEL PROCESO DE FILTRACION

### 2.1. Planteamiento

El drenaje puede tener importancia, sobre todo, en las cercanías del túnel tanto en la sección donde el estado de presiones es bidimensional, como en el frente donde es claramente tridimensional.

Por otra parte, la distribución de tensiones es variable, ya que se pasa de las condiciones iniciales, inmediatas a la apertura del túnel, a las permanentes a través de un régimen transitorio y no se sabe *a priori* cuáles son las condiciones más desfavorables para la construcción del túnel.

Así, pues, se necesita el análisis de este proceso para el proyecto de un túnel como éste, sometido en principio a tan severas condiciones hidráulicas.

En lo que sigue se presenta una herramienta analítica que puede servir, bajo ciertas simplificaciones para realizar ese análisis.

Se supone como hipótesis básica que en las cercanías del túnel, en la sección, el flujo es radial con simetría axial y que en el frente hay simetría esférica. Ello lleva a desprejiciar el término de altura en la carga de agua.

A una distancia  $b$  del túnel la presión es constante e igual a  $u_0$ . En la periferia del túnel antes de la apertura, la presión del agua es  $u_0$ . Al abrirlo se establece la condición de borde para  $r = a$ ,  $u = u_a$  ( $a$ , radio del túnel), y una presión total  $\sigma_r = \sigma_a$ .

El material es elastoplástico perfecto con un módulo de elasticidad  $E$ , un coeficiente de Poisson  $\nu$ , un coeficiente de compresibilidad ligado a ellos  $\chi$ . Los parámetros de resistencia efectiva son un ángulo de rozamiento  $\phi$  y una cohesión

c'. La resistencia rápida sin drenaje es c (se ha supuesto que es independiente de la trayectoria de tensiones). Para la respuesta inmediata hay unos coeficientes de presión intersticial de Henkel B y a.

Se adopta para facilitar la integración de las ecuaciones un coeficiente  $K_0$  de empuje horizontal igual a uno. La carga total del terreno es q.

Se estudia el caso permanente ( $t = \infty$ ), el caso transitorio ( $0 < t < \infty$ ) y además para el análisis de este último caso ha sido necesario la consideración del estado correspondiente  $t = 0^+$ , inmediatamente después de la apertura de la excavación.

En lo que respecta a las permeabilidades se ha supuesto que éstas están ligadas a las tensiones dando una distribución  $K(r)$ . La determinación del estado tensodeformacional está acoplada con la permeabilidad. En nuestro estudio el problema general se resuelve de una manera iterativa: Dado un  $K(r)$  inicial se encuentran las tensiones con las cuales se halla la nueva  $K(r)$  que permite corregir los resultados. La fase de corrección sólo se puede realizar si se disponen de relaciones válidas entre tensiones y permeabilidades.

### 2.1.1. Régimen permanente

Las ecuaciones de equilibrio interno se reducen a:

$$\frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + m \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} = 0 \quad [1a]$$

en donde,  $m = 1$  para la sección.  
 $m = 2$  para el frente.

Pasando a tensiones efectivas queda:

$$\frac{\partial \sigma'_r}{\partial r} + m \frac{\sigma'_r - \sigma'_\theta}{r} = - \frac{du}{dr} = F(r) \quad [1b]$$

Las tensiones en la zona plástica vienen dadas, al resolver la ecuación [1b], teniendo en cuenta la condición de plasticidad (condición de Coulomb), por:

$$\sigma'_r + t = \left( \frac{r}{a} \right)^{mn} [\sigma'_a + t + T(r)] \quad [2a]$$

$$\sigma'_3 + t = \frac{1 + \text{sen } \phi'}{1 - \text{sen } \phi'} \cdot \left( \frac{r}{a} \right)^{mn} [\sigma'_a + t + T(r)] \quad [2b]$$

en donde:

$$n = \frac{2 \text{ sen } \phi'}{1 - \text{sen } \phi'} \quad [3a]$$

$$t = c' \cdot \cot \phi' \quad [3b]$$

$$T(r) = a^{mn} \int_a^r \frac{F(s)}{s^{mn}} ds \quad [4]$$

Esta solución es válida en  $a < r < R$ , siendo R el radio de plastificación que define la posición de la interfaz entre la región en estado plástico y la región en estado elástico.

En la zona elástica la ecuación [1b] se resuelve expresándola en corrimientos mediante las ecuaciones constitutivas de la elasticidad lineal isótropa.

Queda así:

$$K \left[ \frac{\partial^2 y}{\partial r^2} + m \frac{\partial y}{\partial r} \cdot \frac{1}{r} - m \frac{y}{r} \right] = F(r) \quad [5]$$

$$\text{con } K = E \frac{1 - \nu}{1 - \nu - 2 \nu^2}$$

con las condiciones de contorno:

$$\begin{aligned} r = \infty & \quad \sigma'_r = \sigma'_\theta = q - u_\infty \\ r = R & \quad \sigma'_r = \sigma_R - u_R \end{aligned}$$

A los corrimientos obtenidos hay que restarle los movimientos elásticos debidos a la carga  $q'$ , producidos antes de la apertura del túnel.

Las tensiones vienen dadas por:

$$\begin{aligned} \sigma_r = q - \left( \frac{R}{r} \right)^{m+1} \left[ q - \sigma_R + \right. \\ \left. + m \frac{1 - 2 \nu}{1 - \nu} \frac{H(r) - H(R)}{R^{m+1}} \right] \quad [6a] \end{aligned}$$

$$\sigma_0 = q + \frac{1}{m} \left( \frac{R}{r} \right)^{m+1} \left[ q - \sigma_R + m \frac{1-2\nu}{1-\nu} \frac{H(r) - H(R)}{R^{m+1}} \right] - \frac{1-2\nu}{1-\nu} (u_\infty - u_r) \quad [6b]$$

y los corrimientos radiales por:

$$y = \frac{1+\nu}{E} r(q - \sigma_r) \quad [7]$$

en donde  $\sigma_R$  y  $u_R$  son la tensión radial y la presión intersticial respectivamente en la frontera entre las zonas elásticas y plástica y

$$H(r) = \int_b^r s^m (u_\infty - u(s)) ds \quad [8]$$

$\sigma_R$  se obtiene al igualar en la frontera entre zonas, las tensiones radiales dadas por las soluciones elástica y plástica:

$$\sigma_R + t = \frac{1 - \text{sen } \varphi'}{(2m-1) + (m-1) \text{sen } \varphi'} \left[ (2m-1) (q' + t) + \frac{m-1+\nu}{1-\nu} (u_\infty - u_R) \right] + u_R \quad [9]$$

El radio de plastificación se obtiene a su vez según la ecuación implícita:

$$\left( \frac{R}{a} \right)^{mn} [\sigma'_a + t + T(r)] = \frac{1 - \text{sen } \varphi'}{2m-1 + (m-1) \text{sen } \varphi'} \left[ (2m-1) + (q' + t) + \frac{m-1+\nu}{1-\nu} (u_\infty - u_R) \right] \quad [10]$$

resultante de obligar a que cumplan la condición de Coulomb las tensiones elásticas en la interfaz.

Finalmente, el corrimiento en el contorno puede obtenerse si se conoce la dilatancia en la zona plástica por el método ya clásico (2).

Más adelante al estudiar el caso del túnel en terrenos expansivos se hará una aplicación de este método.

Las soluciones anteriores pueden aplicarse al análisis del régimen permanente:

a) La distribución de permeabilidad es  $K(r)$

— El caudal fluente es:

$$\frac{Q \cdot \gamma}{2\pi} = \frac{\Delta u}{\int_a^b \frac{ds}{s^m K(s)}} = \frac{\Delta u}{I_0(b)} \quad [11]$$

siendo:

$$I_0(b) = \int_a^b \frac{ds}{s^m K(s)} \quad [12]$$

— El gradiente (fuerzas de filtración) es:

$$F(r) = -\Delta u \frac{1}{r^m K(r) I_0(b)} \quad [13]$$

— Las funciones auxiliares son:

$$H(r) = \Delta u \int_b^r s^m \left[ 1 - \frac{I_0(s)}{I_0(b)} \right] ds \quad [14]$$

$$T(r) = -\Delta u \frac{a^{mn}}{I_0(b)} \cdot \int \frac{ds}{s^{m(n+1)} K(s)} = -\Delta u a^{mn} \frac{I_n(r)}{I_0(b)} \quad [15]$$

Con:

$$I_n(r) = \int_a^r \frac{ds}{s^{m(n+1)} K(s)} \quad [16]$$

(2) Ver Jiménez Salas, J. A. y otros (1980): «Geotecnia y cimientos III», pp. 1431-1432, Ed. Rueda. Madrid.

El radio de plastificación viene dado por la ecuación:

$$\left(\frac{R}{a}\right)^{mn} \left[ \sigma'_s + t - \Delta u \cdot a^{mn} \frac{l_n(r)}{l_o(b)} \right] =$$

$$= \frac{1 - \text{sen } \varphi'}{2m - 1 + (m - 1) \text{sen } \varphi'} \times$$

$$\times \left\{ (2m - 1)(q' + t) + \right.$$

$$\left. + \frac{m - 1 + \nu}{(2m - 1)(1 - \nu)} \left[ 1 - \frac{l_o(R)}{l_o(b)} \right] \right\} \quad [17]$$

b) Caso de permeabilidad constante K para la sección del túnel:

— El caudal

$$\frac{Q \gamma}{2 \pi} = \Delta u \frac{K}{\ln\left(\frac{b}{a}\right)} \quad [18]$$

— Las presiones intersticiales:

$$u_r = u_s + \Delta u \frac{\ln\left(\frac{r}{a}\right)}{\ln\left(\frac{b}{a}\right)} \quad [19]$$

— Las funciones auxiliares son:

$$H(r) = \Delta u \frac{r^2 \ln\left(\frac{r}{b}\right)}{\ln\left(\frac{b}{a}\right)}$$

$$T(r) = -\Delta u \frac{1 - \left(\frac{a}{R}\right)^n}{\ln\left(\frac{b}{a}\right)^n}$$

— El radio de plasticidad:

$$\left(\frac{R}{a}\right)^n + \frac{1 - \text{sen } \varphi'}{2(1 - \nu)} \frac{\Delta u \ln \frac{R}{a}}{\sigma'_s + t - \frac{\Delta u}{\ln\left(\frac{b}{a}\right)^n}} =$$

$$(1 - \text{sen } \varphi') \left[ q' + t + \frac{\Delta u}{\ln\left(\frac{b}{a}\right)^n} \right] - \frac{\Delta u}{\ln\left(\frac{b}{a}\right)^n}$$

$$\sigma'_s + t - \ln\left(\frac{b}{a}\right)^n \quad [20]$$

Para el frente del túnel:

— El caudal:

$$\frac{Q \gamma}{4 \pi} = \Delta u \frac{K a b}{b - a} \quad [21]$$

— Las presiones intersticiales:

$$u_r = u_s + \Delta u \frac{b(r - a)}{r(b - a)} \quad [22]$$

— Las funciones auxiliares son:

$$H(r) = -\Delta u \frac{a(b - r)^2(b + 2r)}{b(b - a)}$$

$$T(r) = -\frac{\Delta u}{2n + 1} \cdot \frac{b}{b - a} \left[ 1 - \left(\frac{a}{R}\right)^{2n+1} \right]$$

— El radio de plasticidad:

$$\left(\frac{R}{a}\right)^{2n} = A + \frac{B}{(R/a)}$$

$$A = \frac{3(1 - \text{sen } \varphi')}{3 + \text{sen } \varphi'}$$

$$q' + t - \frac{1 + \nu}{3(1 - \nu)} \cdot \frac{a}{b - a} \cdot \Delta u$$

$$\sigma'_s + t - \frac{b}{b - a} \cdot \frac{\Delta u}{2n + 1}$$

$$B = \frac{\Delta u}{2n + 1} \cdot \frac{b}{b - a}$$

$$1 + (2n + 1) \frac{1 + \nu}{1 - \nu} \frac{1 - \text{sen } \varphi'}{3 + \text{sen } \varphi'}$$

$$\sigma'_s + t - \frac{b}{b - a} \cdot \frac{\Delta u}{2n + 1} \quad [23]$$

2.1.2. Régimen transitorio

La distribución de presiones intersticiales durante el régimen transitorio viene expresada por

una ecuación de consolidación:

$$C_v \left[ \left( \frac{\partial (\ln K)}{\partial r} + \frac{m}{r} \right) \cdot \frac{\partial u}{\partial r} + \frac{\partial^2 u}{\partial r^2} \right] = \frac{\partial u}{\partial t} \quad [24]$$

en donde  $C_v(r) = \frac{K(r) \chi(r)}{\gamma_w}$  es un coeficiente

de consolidación local, y

$m = 1$  para la sección del túnel

$m = 2$  para el frente.

Esta ecuación hay que resolverla con las condiciones de contorno siguientes:

$$\begin{aligned} \text{Para } t = 0 \text{ Isocrona inicial} & \quad u = u_o(r) \\ t = \infty \text{ Régimen permanente} & \quad u = u_p(r) \\ r = a \quad u = u_a \text{ para todo } t & \\ r = b \quad u = u_b \text{ para todo } t & \end{aligned}$$

La solución para el caso general se puede obtener mediante la técnica en diferencias finitas de Crank-Nicholson (1947) (3) de rápida convergencia.

El método más elemental, pasando simplemente la ecuación de la consolidación a diferencias finitas, es de difícil convergencia.

En el caso de permeabilidad constante puede darse una solución cerrada tanto para la sección como para el frente.

En ambos casos la solución puede expresarse por la suma:

$$u \cong u_p + u_T \quad [25]$$

El término  $u_p$  está dado por las ecuaciones [19] y [22] para los casos de la sección y el frente respectivamente.

### 1. Para la sección:

El término  $u_T$  puede expresarse por un desarrollo de Bessel-Fourier

$$u_T = \sum_1^n A_n U_o(r \lambda_n) e^{-\lambda_n^2 C_v t} \quad [26]$$

siendo:

$$U_o(r \lambda_n) = J_o(r \lambda_n) Y_o(b \lambda_n) - J_o(b \lambda_n) Y_o(r \lambda_n) \quad [27]$$

en donde  $J_o$  e  $Y_o$  son las funciones de Bessel de orden cero de 1.<sup>a</sup> y 2.<sup>a</sup> especie, respectivamente.

$\lambda_n$  son los autovalores, raíces de la ecuación  $U_o(a \lambda_n) = 0$

$$A_n = \frac{\int_a^b r (u_o - u_p) U_o(r \lambda_n) dr}{r^2 U_1(r \lambda_n) \Big|_a^b} \quad [28]$$

con

$$U_1(r \lambda_n) = J_1(r \lambda_n) Y_o(b \lambda_n) - J_o(b \lambda_n) Y_1(r \lambda_n) \quad [29]$$

siendo  $J_1$  e  $Y_1$  las funciones de Bessel de orden uno y 1.<sup>a</sup> y 2.<sup>a</sup> especie (4).

### 2. Para el frente

El término  $u_T$  viene dado por el desarrollo de Fourier:

$$u_T = \frac{1}{r} \sum_1^n A_n \sin \left( n \pi \frac{r-a}{b-a} \right) e^{-n^2 \frac{\pi^2 C_v}{(b-a)^2} t} \quad [30]$$

$$A_n = \frac{2}{b-a} \int_a^b r (u_o - u_p) \sin \left( n \pi \frac{r-a}{b-a} \right) dr \quad [31]$$

En estas ecuaciones  $u_o$  es la isocrona inicial que se estudiará en el apartado siguiente.

#### 2.1.3. Isocrona inicial

Se hace el análisis en presiones totales ( $\phi = 0$ ). Se supone que al abrir el túnel el terreno funciona con una resistencia al corte sin drenaje de valor  $c$ , en todo el macizo independientemente de la trayectoria de tensiones, y que podemos evaluar como la mitad de la resistencia a compresión simple  $R_u$ .

Dados los coeficientes de presión intersticial  $\bar{a}$  y  $\bar{B}$  de Henkel puede establecerse la isocrona inicial por:

$$u_o(r) = \infty + \bar{B} (\Delta \sigma_{oct} + \bar{a} \Delta \tau_{oct})$$

Los cambios de tensiones octaédricas se han obtenido en la tabla 1.

(3) Crank (1948): «The mathematical of Diffusion». Clarendon Press Oxford.

(4) Hildebrand (1948): «Advanced Calculus for Engineers». Prentice Hall. New York.

TABLA 1

VARIACION INICIAL DE LAS PRESIONES TOTALES

- a) Estado antes de la apertura  $\sigma_{oct} = q$   $\tau_{oct} = 0$   
 b) Inmediatamente después de la apertura

— Radio de plastificación  $\frac{R}{a} = \exp\left(\frac{q - \sigma_a}{2 m c} - \frac{1}{m + 1}\right)$  [33]

— Distribución de tensiones  
 Zona plástica  $r < R$   $\sigma_r = \sigma_a + 2 m c \ln \frac{r}{a}$   $\sigma_\theta = \sigma_r + 2 c$   $\sigma_x = \sigma_r + m c$  [34]

$\sigma_{oct} = q + 2 m c \ln \frac{R}{a}$   $\tau_{oct} = c \cdot \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{m^2 - 2 m + 4} \left(\frac{R}{r}\right)^{m+1}$  [35]

Zona elástica  $r > R$   $\sigma_r = q - \frac{2 m}{m + 1} c \cdot \left(\frac{R}{r}\right)^{m+1}$   $\sigma_\theta = q + \frac{2}{m + 1} c \cdot \left(\frac{R}{r}\right)^{m+1}$   
 $\sigma_x = q + \frac{2(m-1)}{m+1} c \cdot \left(\frac{R}{r}\right)^{m+1}$  [36]

$\sigma_{oct} = q$   $\tau_{oct} = c \cdot \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \frac{\sqrt{m^2 - m + 1}}{m + 1}$  [37]

c) Cambio de tensiones octaédricas  
 Zona plástica  $r < R$   $\Delta \sigma_{oct} = 2 m c \ln \frac{R}{r}$   $\Delta \tau_{oct} = c \cdot \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{m^2 - 2 m + 4} \left(\frac{R}{r}\right)^{m+1}$  [38]

Zona elástica  $r > R$   $\Delta \sigma_{oct} = 0$   $\Delta \tau_{oct} = c \cdot \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \frac{\sqrt{m^2 - m + 1}}{m + 1} \left(\frac{R}{r}\right)^{m+1}$  [39]

2.2. Resultado del análisis

1) Sección tipo del túnel

a) Permeabilidad constante

En la figura 1 se presenta como varía el radio de plastificación en función de la presión intersticial con el acuífero a 200 m. del túnel.

En la figura 2 lo que se ha variado es la carga del acuífero. Mientras que en la figura 3 se comparan los radios de plastificación para dos ángulos de rozamiento distintos.

En la figura 4 se ve cómo influye la distancia del acuífero en dos condiciones de drenaje distintas.

b) Permeabilidad distinta en las zonas plásticas y elásticas

En las figuras 5 y 6 se ve cómo se relaciona el radio de plasticidad con la distancia del acuífero para varias relaciones de permeabilidad en dos tipos de materiales.

Se comprueba la gran influencia que tiene en el sentido estabilizador que la zona plástica sea más permeable que la elástica.

2) Frente del túnel

Sólo se presentan ejemplos correspondientes a permeabilidad constante.

En la figura 7 se comprueba la influencia des-

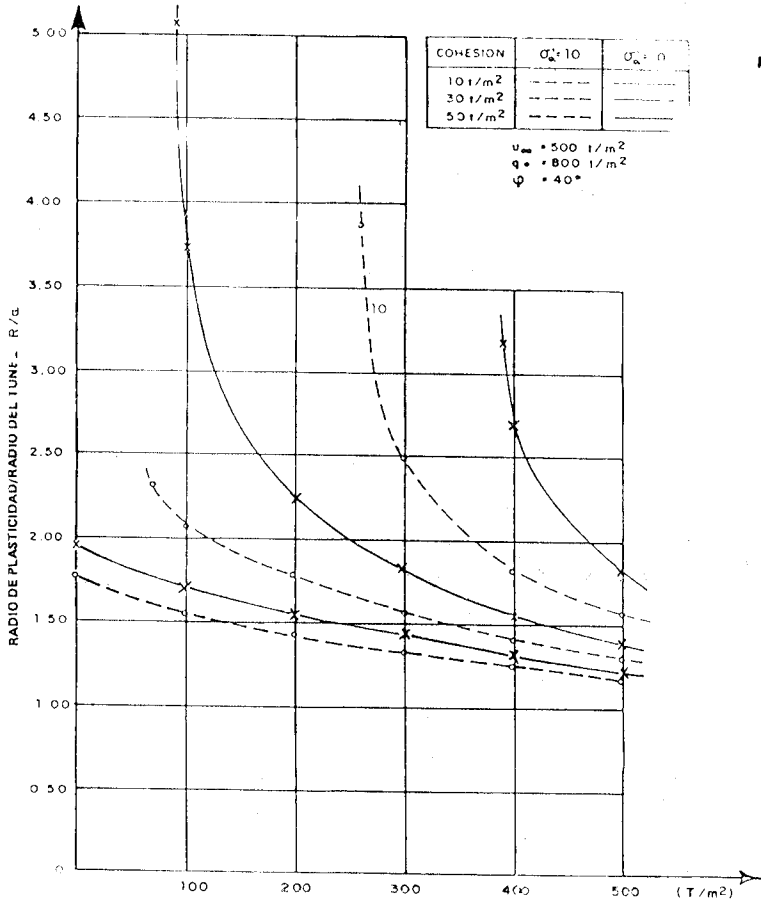


Fig. 1.—Presión intersticial en el túnel  $u_a$ .

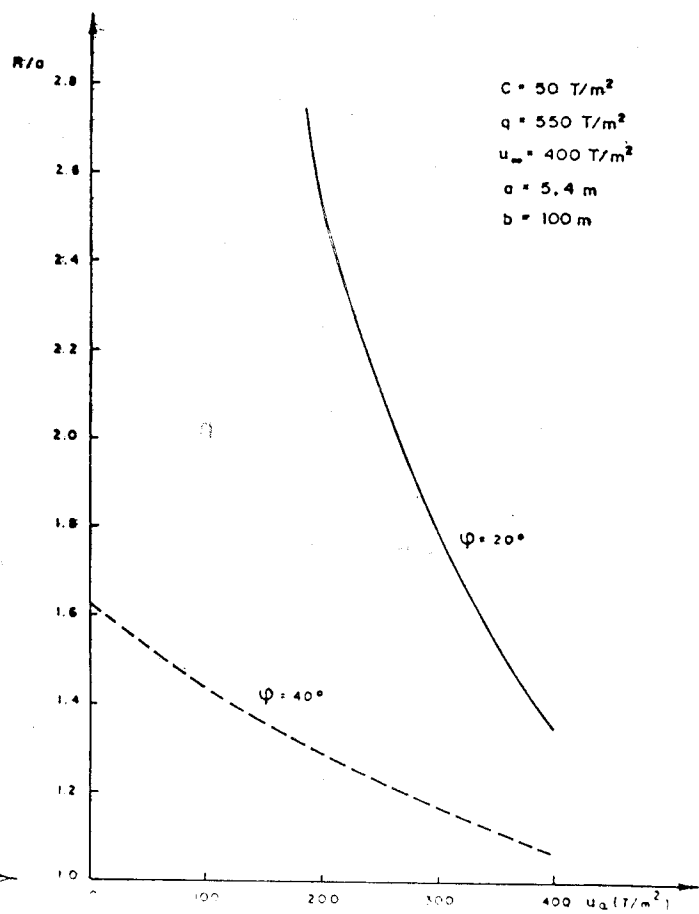


Fig. 3.—Sección tipo del túnel. Radio de la zona plastificada. Influencia del drenaje.

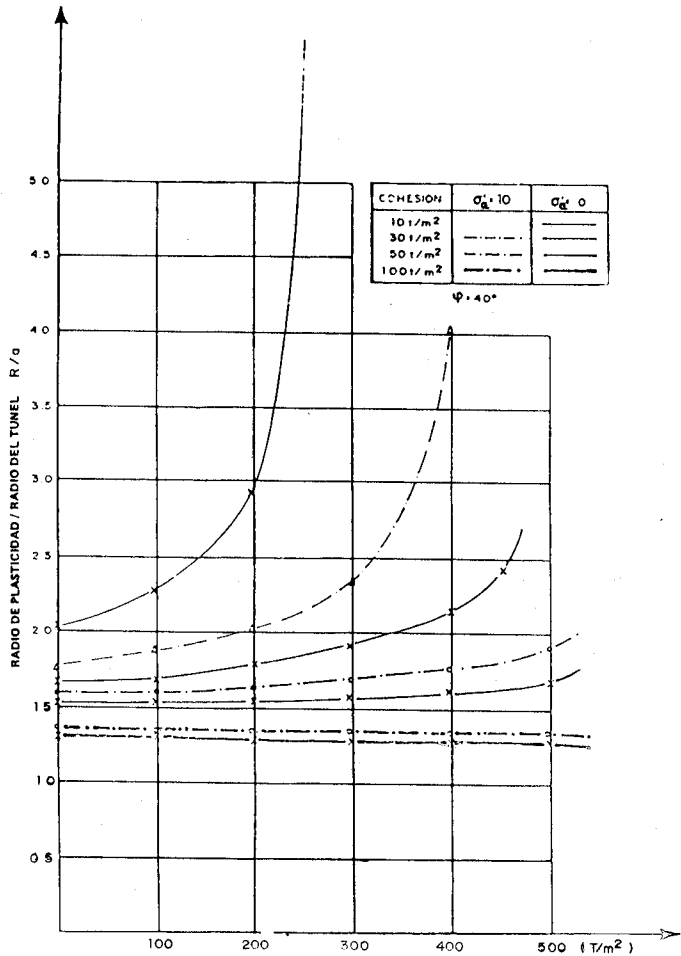


Fig. 2.—Carga de agua  $u_w$ .

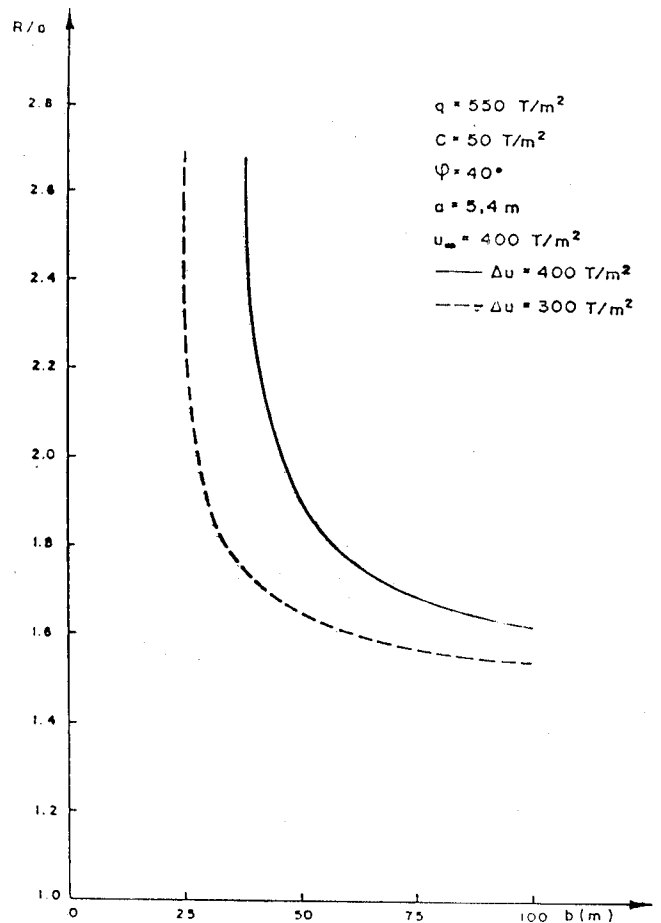


Fig. 4.—Sección. Radio de plastificación.



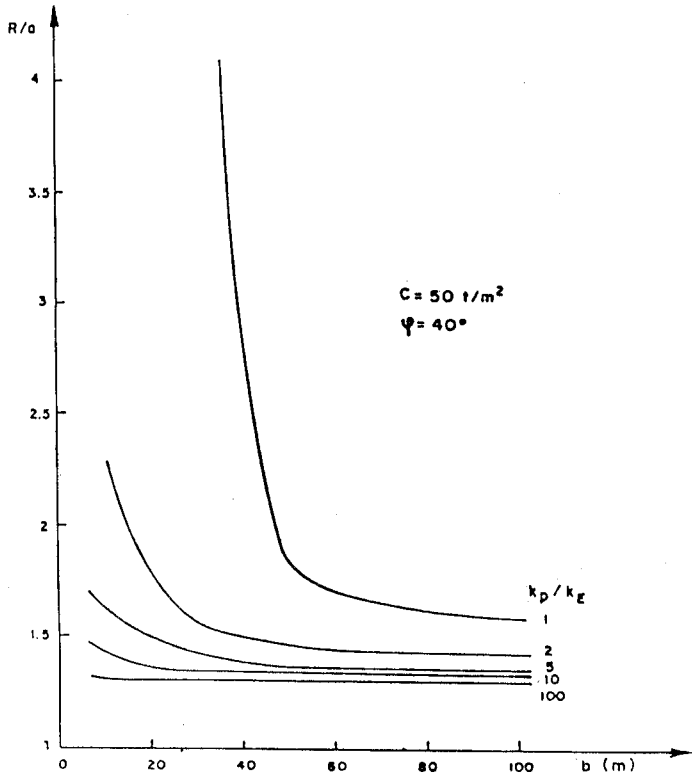


Fig. 5.—Sección. Radios de la zona plástica para distintas relaciones entre las permeabilidades de las zonas plásticas ( $K_p$ ) y elástica ( $K_e$ ).

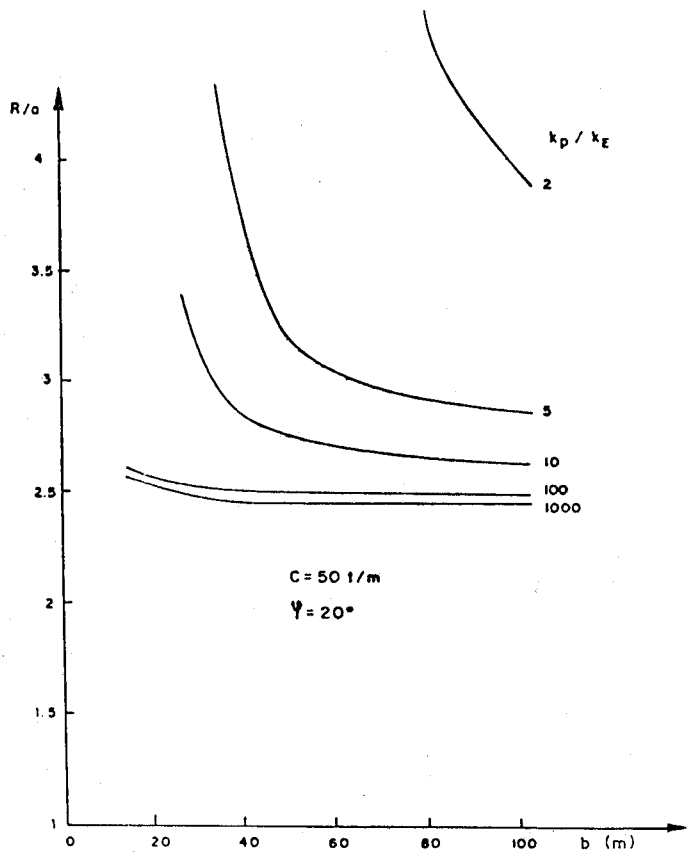


Fig. 6.—Sección. Radios de la zona plástica para distintas relaciones entre las permeabilidades de las zonas plásticas ( $K_p$ ) y elástica ( $K_e$ ).

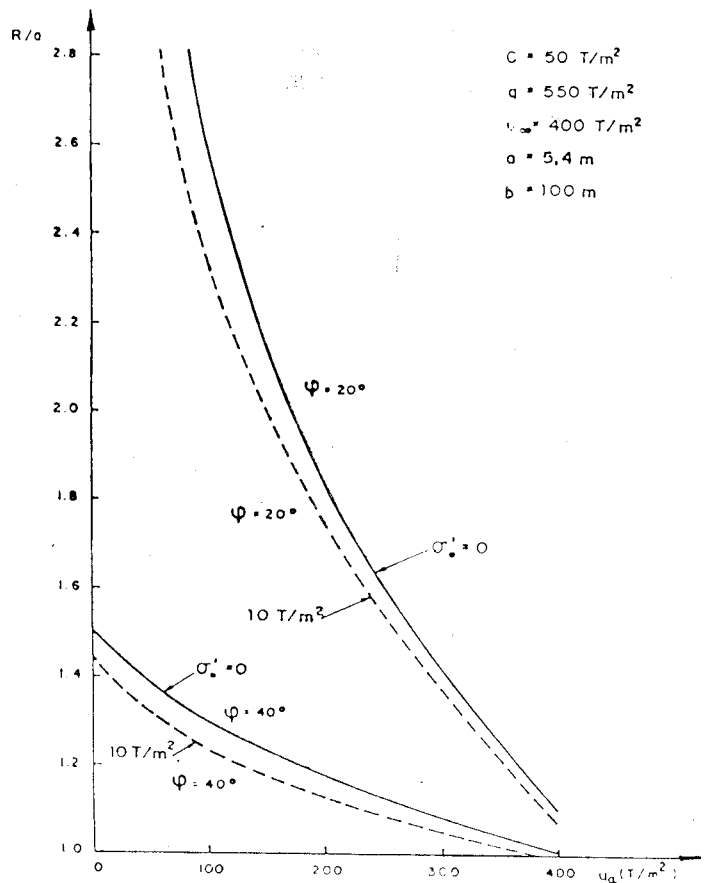


Fig. 7.—Frente del túnel. Radio de la zona plastificada. Influencia del drenaje.

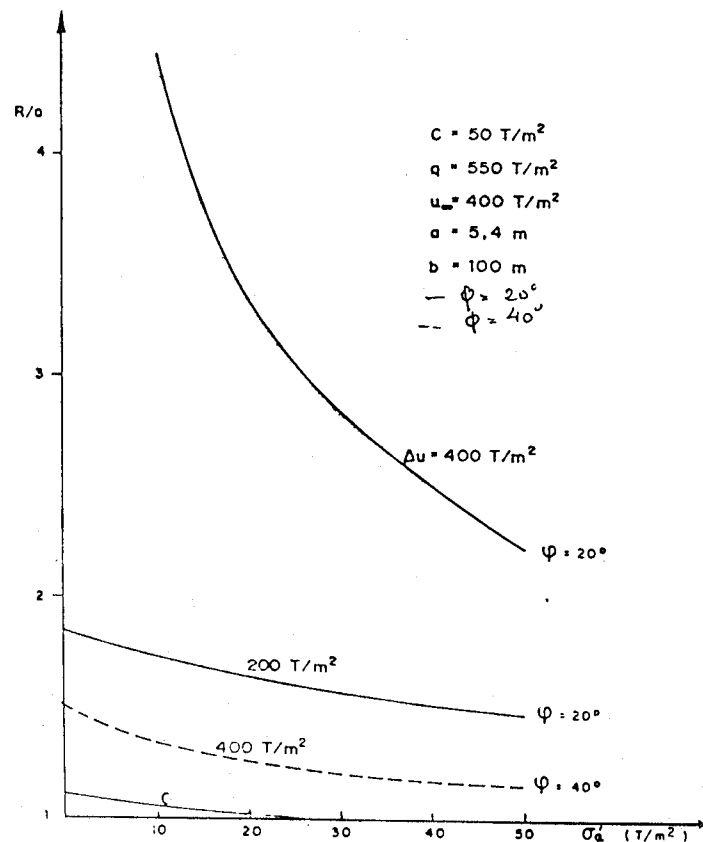


Fig. 8.—Frente del túnel. Radio de la zona plastificada en función de la presión interior y el drenaje.

# CONDICIONES GEOTECNICAS DEL TUNEL BAJO EL ESTRECHO DE GIBRALTAR

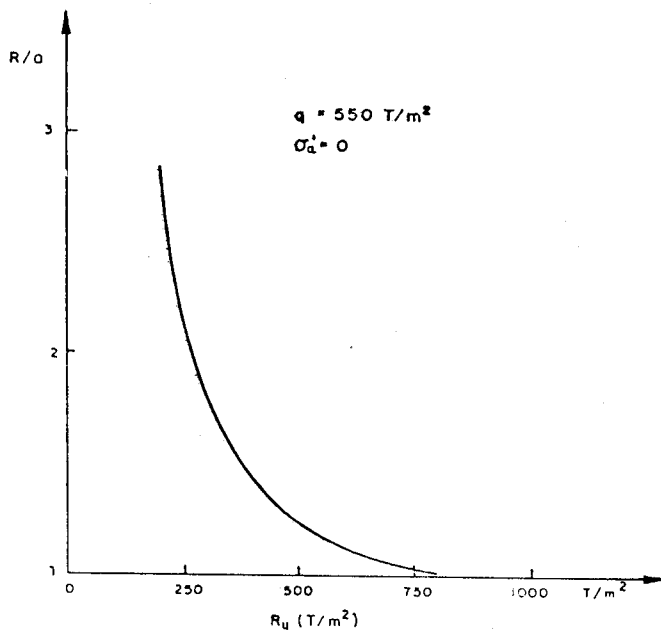
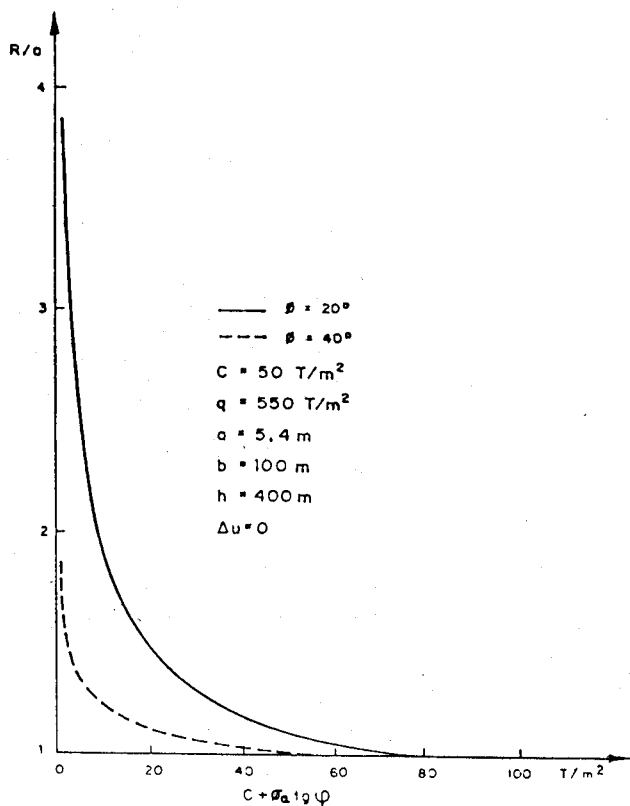
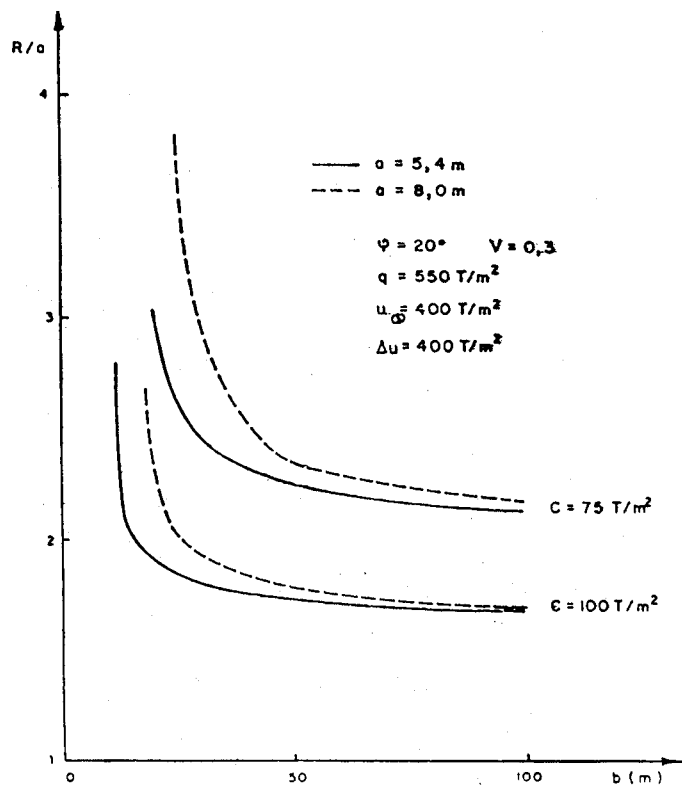
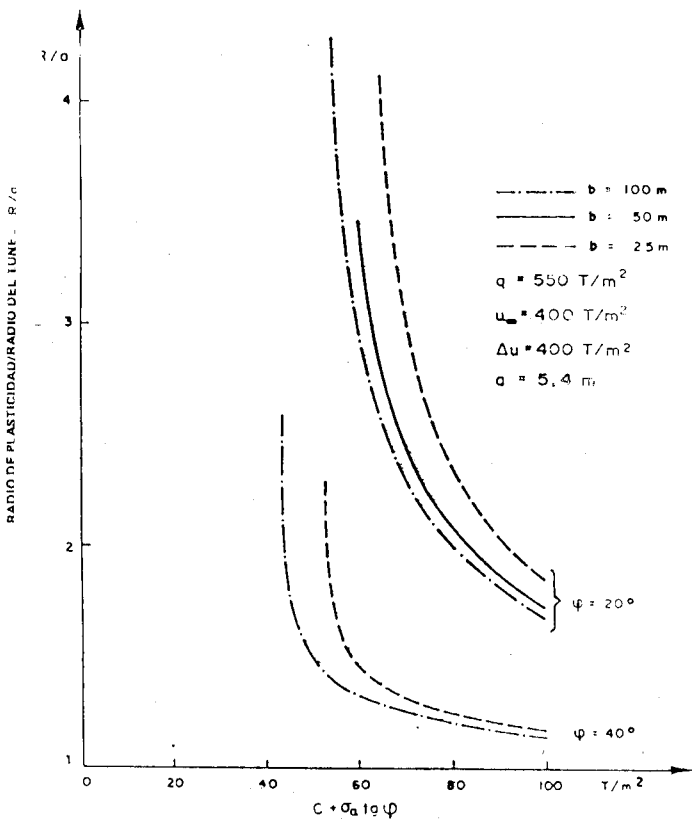


Fig. 10. — Frente del túnel. Radio de la zona plastificada.

Fig. 12. — Frente del túnel. Estabilidad inmediata.

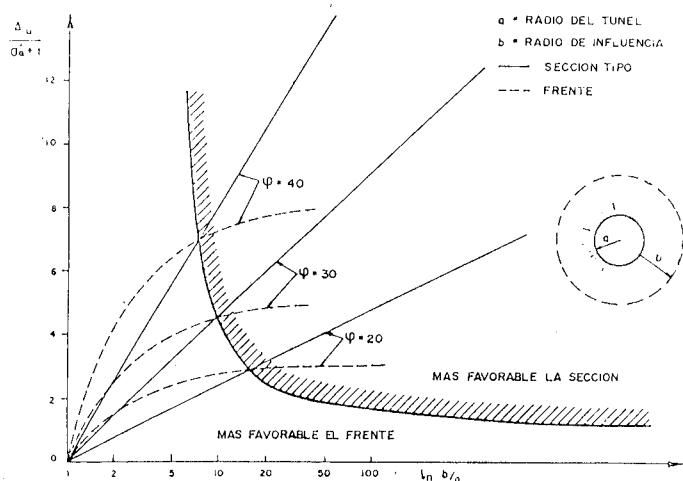


Fig. 13.—Comparación del drenaje límite entre el frente y la sección tipo del túnel.

favorable de la disminución del ángulo de rozamiento, de la presión de estabilización y de la presión del agua en el frente del túnel.

En la figura 8 se hace un análisis similar llegando a presiones de estabilización fuertes.

La figura 9 es muy interesante, ya que muestra las condiciones críticas en que entraría el frente del túnel para cohesiones por debajo de los 5-7 kg/cm<sup>2</sup> (según que el ángulo de rozamiento pasará de 40 a 20°) con cargas de agua a 400 T/m<sup>2</sup> y drenaje total.

La figura 11 muestra la variación del radio de plastificación para algunas resistencias de los materiales y en función de la distancia del acuífero.

La estabilidad inmediata del frente se analiza en la figura 12 en función de la resistencia a la compresión simple, suponiendo que ésta es constante e independientemente de la trayectoria de presiones.

Finalmente en la figura 13 se hace una comparación entre las condiciones que llevan a la inestabilidad en el frente y en la sección. Para distancias pequeñas del acuífero es más estable el frente, pero al aumentar la distancia se invierten las condiciones.

### 2.3. Conclusiones

La teoría expuesta se presenta muy apropiada para describir el comportamiento del túnel y de su frente en relación con la filtración.

Aspectos tan importantes como la influencia del drenaje en los radios de plastificación, convergencia, condiciones límites que producen la inestabilidad total, etc., aparecen claramente definidos en función de las condiciones hidrogeológicas, características geotécnicas y cargas del terreno.

Con gran facilidad pueden realizarse estudios de sensibilidad frente a la influencia de los diversos parámetros.

En el punto siguiente aplicaremos algunos de sus resultados al estudio de túneles en terrenos expansivos.

Para el perfeccionamiento de esta teoría se necesita una investigación básica en varios campos de la geotécnica tales como:

- Relaciones permeabilidad-tensión-deformación.
- Relaciones tensión-deformación a grandes presiones.
- Problemas de succión en la descarga.
- Relaciones tensión-deformación post-rotura del material, etcétera.

## 3. TUNELES EN TERRENOS EXPANSIVOS

### 3.1. El fenómeno de la expansión

El fenómeno de la expansión del terreno durante la ejecución de un túnel es bien conocido desde antiguo. Hay que recordar que fue el hinchamiento de unas margas, durante la ejecución de una obra de este tipo, una de las incitaciones que condujeron a Terzaghi a pensar que la Ingeniería Civil tenía un conocimiento insuficiente de las propiedades de las rocas y de los suelos. Y esto fue lo que le llevó a idear el primer aparato de laboratorio, que fue creado para medir hinchamientos, por lo que recibió el nombre de «edómetro». Hoy lo seguimos utilizando prácticamente en su forma primitiva, pero casi siempre con otro objeto, y podemos detectar los países que se incorporaron tardíamente a la investigación sobre estos temas, porque le dan otro nombre, el de *consolidómetro*, que es el que, ciertamente, corresponde a su utilización corriente en la actualidad.

## CONDICIONES GEOTECNICAS DEL TUNEL BAJO EL ESTRECHO DE GIBRALTAR

Las dificultades que la expansión del terreno produce en la perforación de túneles son grandes y frecuentes. Bien recientemente la «argilla scagliosa» ha tenido prácticamente detenidos durante algunos meses los trabajos en un túnel de la nueva línea «directísima» entre Roma y Florencia. En Stuttgart la construcción del metropolitano en el keuper yesoso ha tropezado con problemas que no pueden considerarse terminados por completo, ya que hay algún trayecto que continúa con un movimiento ascensional constante, aunque tan solo de unos pocos milímetros al año.

Tampoco se ha obtenido un éxito definitivo en el túnel Pandoh-Baggi, en la India, en las estribaciones del Himalaya. En este túnel, de 13 km. de longitud, la solera llegó a levantarse hasta 11 cm. por día, durante la construcción. Hubo puntos en los que el hinchamiento totalizó dos metros. También, en las mismas estribaciones, el túnel que une los ríos Beas y Suttley, de 25,46 km. de longitud y 8,53/7,62 m. de diámetro ha tropezado con terrenos expansivos en varios tramos, lo que ha constituido una de las causas principales de que su perforación haya durado once años y haya costado 73 accidentes mortales.

Los fenómenos de expansión de estos dos túneles en la India tienen, sin embargo, un carácter distinto de los encontrados en los túneles alemanes o italianos citados: se trata de roca que fluye, evidentemente aumentando de volumen, pero a causa, principalmente, de unas tensiones internas preexistentes muy elevadas. Caso parecido vienen a constituirlos numerosos túneles japoneses que atraviesan la serpentina laminada llamada localmente «jamongan», la cual tiene unas fuertes presiones propias, consecuencia del aumento de volumen del olivino al hidratarse, para convertirse en serpentina.

La expansión del terreno en un túnel puede provenir, pues, de causas muy diversas. Vamos a intentar una clasificación, basándonos en la de Lindner (5), completándola en lo que resulte necesario.

(5) Lindner, E.: «Swelling Rock: a Review». Proc. Sp. Conf. ASCE. «Rock Eng. for Foundations and Slopes». Vol. 1, pp. 141-181.

TABLA 2  
CLASIFICACION DE LINDNER DE LOS TERRENOS  
EXPANSIVOS

Categoría Núm.	Descripción de la categoría
1	<i>Interactiva con las tensiones</i> (Dividida en dos subcategorías). (1) Levantamiento elastoplástico, producido directamente a continuación de la descarga, y (2) Expansión por desequilibrio interno, debido a la reducción de presiones negativas del agua intersticial.
2	<i>Reacción química</i> Expansión del material constitutivo, relacionada con las tensiones, pero debida a transformaciones químicas.
3	<i>Pérdida de la resistencia interna</i> (Cementación).
4	<i>Reptación (Creep).</i>
5	<i>Helada</i>

La clasificación de Lindner es la de la tabla 2 y la que proponemos se desarrolla en la siguiente tabla 3.

Sobre esta última hay que hacer los siguientes comentarios:

- La deformación elástica de la clase 1.1 puede tener como consecuencia un aumento del volumen  $n$  del terreno importante, si existe anisotropía. Este es un caso muy corriente, pues, al menos, se encuentra en todos los terrenos esquistosos y estratificados.

En ciertas ocasiones puede asociarse a la 2.1, cuando las fallas y diaclasas o planos de estratificación contengan minerales arcillosos expansivos. Un punto interesante es que en estos casos la arcilla se conserva frecuentemente sin hinchar aún cerca de la superficie. El fenómeno se desencadena con la excavación. Esto puede deberse a que la arcilla está constreñida por la dificultad de extrusión (6).

(6) Pusch, P.: «Water intake and Swelling of montmorillonitic Clay Seams in Rock». IV Congress ISRM. Montreux, 1979. 1: 273-278.

# CONDICIONES GEOTECNICAS DEL TUNEL BAJO EL ESTRECHO DE GIBRALTAR

TABLA 3.1  
CLASIFICACION PROPUESTA DE LOS TERRENOS EXPANSIVOS

Tipo	Clase	Descripción
1. MECANICA	1.1. Inicial (elástica).	Deformación elástica del material hacia el interior del agujero, que puede ser importante si el terreno es blando.
	1.2. Fluencia (plástica).	Convergencia progresiva debido a la progresión del anillo plastificado. Puede llegar a ser muy lenta, incluyendo la clase 4 de Lindner.
	1.3. Primaria (relajación de tensiones capilares)	Convergencia progresiva debida al aumento de volumen diferido del material. El retraso se debe a la necesidad de aumentar el contenido de humedad, disminuyendo la tensión capilar y, en consecuencia, la efectiva.
	1.4. Secundaria (esponjamiento diferido del terreno, debido a debilitación de su esqueleto)	Convergencia progresiva debido al aumento de volumen diferido del material. El retraso se debe al deslizamiento o rotura de enlaces diagenéticos, lo que transfiere su carga a otros enlaces, que resultarán sobrecargados y fallarán más tarde.
2. FISICO-QUIMICA	2.1. Hidratación de minerales silicatados.	Aumento de volumen de sílice opalina u otros minerales relacionados. Hidratación de arcillas por admisión de moléculas de agua entre las hojas de su red atómica. Caolinización de los feldespatos, rápida si ya estaba iniciada.
	2.2. Hidratación de otros minerales	Como más frecuente la hidratación de la anhidrita, pasado a yeso con un aumento de 20 por 100 de volumen. Puede presentarse también en el sulfato magnésico.
	2.3. Oxidación de minerales	Como más frecuente la pirita con intervención, o no, de la pirrotina o de bacterias para acelerar la reacción. En presencia de ión calcio, formación de yeso secundaria.
3. HELADA		Levantamiento de la solera en algún túnel carretero con circulación intensa de aire muy frío, por formación de lentejones de hielo en terreno limoso.

— La reptación de la clase 1.2 es típica de las sales de sodio y potasio, pero también se encuentra en el yeso y, menos, en la anhidrita. Puede aparecer, sin embargo, en rocas más duras, por ejemplo, en el granito dependiendo del estado de tensiones. Cualquier cuerpo, incluso un cristal de cuarzo, experimenta fluencia cuando podemos suministrarle la «energía de activación» necesaria para producir saltos sucesivos en su red atómica (7).

(7) Jiménez Salas, J. A. y Justo Alpañes, J. L.: «Geotecnia y cimientos, I», p. 177.

— La clase 1.3, es quizá la más típica del fenómeno, y posiblemente la única a que se refieren muchos autores cuando hablan de «terrenos expansivos». Esta clase de hinchamiento es el principal en margas y en arcillas muy preconsolidadas.

— La clase 1.4 es, sin embargo, más importante de lo que se suele pensar, pues precisamente en estos terrenos es en los que se han establecido enlaces diagenéticos. Algunos de éstos se rompen y las fuerzas que resistían se transmiten a otros enlaces, algunos de los cuales fa-

llan a su vez. El fenómeno sigue ecuaciones parecidas a las de la difusión y puede ser muy lento, confundiendo con el 1.2, la diferencia consiste en que el primero, en parte, es intracristalino y el segundo puramente entre contactos. También, que el segundo conduce a mayores variaciones de volumen, mientras que en el primero predomina la deformación tangencial.

- La clase 2.1 se diferencia difícilmente del 1.3 con el que coexiste con frecuencia. Es particularmente intensa en las arcillas de estructura ternaria, tipo esmectita (montmorillonita, corrensita, etc.). Pero, más moderadamente, puede presentarse aislada en rocas con sílice amorfa, exaltándose en ambiente alcalino. En roca compacta, es difícil que llegue a tener importancia, por dificultad de acceso del agua, pero no ocurre lo mismo en algunas areniscas con cemento de sílice amorfa, con aspecto muy resistente, próximo a una cuarcita.

La velocidad de producción del fenómeno, cuando no existen minerales arcillosos ya formados, es pequeña, por lo que no suele ser capaz de producirse durante la perforación de un túnel. Pero es la responsable de tensiones internas que, a su vez, se manifiestan como movimientos del tipo 1.1 ó 1.2. Puede asegurarse que esto es lo que ocurre en el «jamon-gan» del Japón, olivino serpentizado con fuerte fluencia debido a sus tensiones propias.

- Un punto que suele olvidarse es la influencia de la presión osmótica o, en general, de la composición del fluido intersticial, sobre la cual ya llamamos la atención en 1953 (8). Recientemente, Morgenstern y Balasubramanian (9) han hecho notar cómo dos esquistos arcillo-

sos, predominantemente montmorillonítico uno («Bearpaw shale») e illítico el segundo («Morden shale»), hinchan de muy distinta manera según el líquido con el que se pongan en contacto. En particular, si se ponen en contacto con líquido de la misma composición del que llena sus poros (extraído por simple presión de otras muestras del mismo esquisto) hinchan poco, y de tal forma, que se adapta a un modelo mecánico de pura elasticidad del esqueleto, ante una disminución de las presiones efectivas.

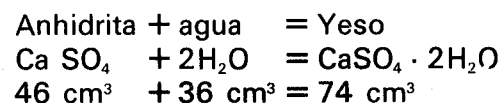
Puestos en contacto con agua destilada hinchan mucho más, ya que entonces se relajan, además, las fuerzas fisicoquímicas que mantiene las partículas arcillosas en una posición de equilibrio.

La demostración es todavía más convincente cuando dichos autores nos presentan las medidas de presión con hinchamiento nulo. En contacto con líquido extraído de los poros, es relativamente pequeña, e igual a la inicial, si el líquido en contacto es agua destilada. En este último caso, sin embargo, aumenta después, pero muy lentamente (la difusión necesita un tiempo considerable).

Pero, si dejamos hinchar la muestra ligeramente (tres por mil) en contacto con agua destilada, y luego la volvemos, mediante presión, a la altura primitiva la presión se multiplica, sin duda, porque ha admitido agua destilada en sus poros.

Todos estos datos pueden colaborar a encontrar una explicación al hecho observado y fundamental para el tratamiento práctico del terreno: muchos terrenos expansivos no manifiestan esta propiedad hasta que no se les perturba.

- La hidratación de la anhidrita puede ser la responsable de un gran número de los casos publicados y de otros conocidos directamente. La reacción es la siguiente:



(8) Jiménez Salas, J. A. y Serratos, J. M. (1953): «Compressibility of Clays», 3<sup>rd</sup> Conf. Int. Soil Mech. Found. 1: 192-198.

(9) Morgenstern, N. R. y Balasubramanian, B. I.: «Effects of pore fluid on the swelling of clay-shales». Conf. Exp. Soils ASCE. Denver, 1980, pp. 190-205.

Así, pues, el yeso ocupa  $(74-46)/46$  igual al 61 por 100 más que la anhidrita de que procede. Sin embargo, observemos que la anhidrita más el agua ocupa  $46 + 36 = 82 \text{ cm}^3$ , con lo que, a partir de su marcha, lo que se produce en realidad es una contracción del  $100 \times (82 - 74)/82 = 10$  por 100.

Así, pues, para que pueda haber hinchamiento hace falta una aportación de agua que venga del exterior (10).

La posibilidad de aparición del fenómeno y su velocidad dependen del estado de tensiones y de la temperatura. Bajo una presión considerable la anhidrita es estable.

Depende también del modo de presentación de la anhidrita. En masa compacta, su hidratación es muy lenta, pero es muy frecuente que se presente en finas venas distribuidas facilitando el acceso del agua.

En un trabajo reciente (11) hemos encontrado que la anhidrita finamente dividida hincha con rapidez. En cambio el doctor Grim (12) ha probado que los cristales de anhidrita se hidratan a un ritmo muy lento y atribuye a los minerales arcillosos expansivos que acompañan generalmente a las margas anhidríticas los hinchamientos observados en ellos.

También hay que hacer notar que un material de esta clase, fuertemente remoldeado (como con apisonado con patas de cabra) hincha mucho más lentamente. La hidratación de la anhidrita produce una costra en la superficie que casi impide la penetración ulterior del agua. Pero este no es el caso de un túnel.

(10) Einfalt, H. C., Fecker, E. y Gotz, H. P.: «Das Dreiphasensystem Ton, Anhydrit, Gips und dessen Zeitablangiges Verhalten bei Zugabe von Wässrigen Lösungen». 4.ª Conf. Int. SIMR. Montreux, 1979, vol. I, pp. 123-130.

(11) Serrano, A. A. y otros (1980): «Analysis of Swelling Phenomena in a Gypsum-Marl Formation». 10th Int. Conf. Soil Mech. Found. 4/53, pp. 779-784.

(12) Grim, R. E. (1980): Comunicación personal.

— Respecto a la clase 2.3 la más típica es la debida a la oxidación de la pirita, la cual, por otra parte, debe su existencia en general a la sedimentación en cuencas cerradas con materia orgánica y deficiencia de oxígeno. El conocimiento claro del proceso se tiene a partir de que, hacia el final de los años 50, se señaló, en Oslo, un hinchamiento enérgico de ciertas pizarras paleozóicas muy oscuras, que se comprobó que llevaban pirita. Después, se presentó el mismo problema en Otawa y en algunas ciudades de los Estados Unidos, en la región de los Grandes Lagos, como en Cleveland. También se ha observado, por supuesto, en otros sitios de Escandinavia, como en Ostersund (Suecia). Se ha comprobado también en pizarras cretáceas y silúricas en España y en calizas piritosas, en Kansas.

La oxidación de la pirita produce sulfato de hierro y ácido sulfúrico, el cual produce a su vez yeso y otro mineral relacionado, la jarosita. La presencia de otro sulfuro de hierro complejo, la pirrotina (pirita magnética) sirve de acelerador, pero el fenómeno puede también acelerarse por la intervención de bacterias oxidantes. En el proceso, la roca se acidifica, controlándose cuando el pH llega a ser tal que ya impide la vida bacteriana, por lo que la presencia de alguna cantidad de carbonato cálcico puede aumentar el fenómeno, proporcionando el calcio preciso para la formación de yeso y también manteniendo el pH en límites adecuados. Pasada una cierta proporción de carbonatos puede jugar, en cambio, un papel retardador, pues con pH elevado las bacterias no actúan. Por otra razón, se ha empleado alguna vez para combatir este fenómeno la lechada de cal. Aparte de esto, la oxidación actúa difícilmente con saturación completa, por lo que en ciertos casos (Ostersund), de cimentaciones se ha encontrado que la solución consistió en mantener alta la capa freática. En túneles esto no es posible, pero se obtienen resultados no completos cubriendo inmediatamente con un producto

asfáltico. La gunita resulta no ser suficientemente impermeable, aparte de ser atacada posteriormente por las aguas ácidas.

- Por último, el levantamiento de la solera de algunos túneles por formación de lentejones de hielo, sigue el mismo proceso que en los firmes de carreteras situados al exterior. Ha ocurrido en túneles de montaña, a favor de una fuerte ventilación.

### 3.2. Posibilidades de estudio sistemático

Los hinchamientos por oxidación son bastante anárquicos, produciéndose a partir de diaclasas a zonas de cizallamiento, por lo que no tienen más posibilidades de análisis que el que se deriva de la observación, aunque ayudada por determinaciones químicas, de acidez y también, como hemos dicho, biológicas.

Pero los procesos de hidratación suelen producirse en toda la masa y permiten establecer modelos que conducen a conclusiones interesantes. Hay alguna excepción cuando se trata de capas irregulares y de pequeña potencia.

No podemos, por supuesto, en esta ocasión hacer un tratamiento completo del problema, pero vamos a hacer algunas indicaciones al respecto.

### 3.3. Modelo matemático de un túnel en terreno expansivo

En primer lugar tenemos una masa de terreno que, en el caso más típico, es una roca blanda. Puede caracterizarse por su resistencia a la compresión simple,  $R_u$ , su módulo de elasticidad  $E$  y el módulo de Poisson  $\nu$ .

Esta roca tiene propiedades de expansión, pero éstas tan sólo se desencadenan a partir de un estado de decompresión. En el caso de un túnel, esta decompresión se produce esencialmente por una plastificación alrededor del agujero. Allí donde los esfuerzos cortantes superan a la resistencia de la roca, ésta fluye, pero, al mismo tiempo, experimenta dilatación que debilita sus enlaces diagenéticos y comienza a hin-

char. La magnitud de este hinchamiento puede caracterizarse por el parámetro  $H$  por 100, que es el tanto por ciento de aumento de volumen desde el estado original de la roca, el estado de máximo hinchamiento que podemos definirle como el que se consigue bajo un estado de compresión igual a  $100 \text{ g/cm}^2$  en las dos tensiones principales  $\sigma_r$  y  $\sigma_\theta$  siendo la tercera  $\sigma_x$ , la que se produzca en un estado plano de deformación, que es como el terreno se encuentra solicitado en un túnel, una vez que el frente ha pasado.

En el caso del frente debido a la simetría esférica la tensión intermedia  $\sigma_x$  es igual también a  $\sigma_\theta$ .

Puede admitirse que el hinchamiento para cualquier estado de tensiones será igual a:

$$\delta_r = \lambda_m \ln \frac{q}{(\sigma_\theta + \sigma_r)/2} \quad [40]$$

en donde  $\lambda_m$  toma el valor  $\lambda_1$  para la sección plana del túnel y  $\lambda_2$  para el frente, y siendo  $q$  la presión, que supondremos con repartición esférica reinante en el terreno antes de la perforación del túnel.

$$\delta_r = \lambda_m \ln \frac{2q}{\sigma_r (K_p + 1)}$$

En cuanto a  $K_p$  es el coeficiente de empuje pasivo:

$$K_p = \frac{1 + \text{sen } \phi}{1 - \text{sen } \phi}$$

que es la relación entre  $\sigma_r$  y  $\sigma_\theta$ , puesto que estamos en zona plástica, y debido al hinchamiento y al remoldeo consecuente a la plastificación puede considerarse que la cohesión será nula o muy reducida.

$$\delta_r = \lambda_m \ln \frac{(1 - \text{sen } \phi) \cdot q}{\sigma_r} \quad [41]$$

Dentro del anillo plastificado la condición de equilibrio, como hemos visto (ecuación 1a) es:

$$\frac{d\sigma_r}{dr} = m \frac{\sigma_\theta - \sigma_r}{r} = n m \frac{\sigma_r}{r} \quad [42]$$

que integrada con las condiciones de contorno da (ecuación 2a):

$$\sigma_r = \sigma_a \left( \frac{r}{a} \right)^{nm} \quad [43]$$



Entre la zona elástica y la plástica existe la llamada zona de transformación (13) donde realmente se está produciendo la rotura con tensiones próximas al pico y con actuación importante de la dilatancia. De la extensión de esta zona hay poca información aunque podemos suponer que es pequeña. Más allá en la zona elástica el terreno no se ha degradado en absoluto, la expansividad no se ha «despertado» (14), el material tiene su resistencia intacta que podemos valorar en tensiones totales por una resistencia a la compresión  $R_u$  y un ángulo de rozamiento nulo.

En ese caso, si consideramos la zona elástica en la frontera, límite entre la zona elástica y la zona de transformación debe ocurrir:

$$\sigma_r = q - \frac{R_u}{2} = q - c \quad [44]$$

llamando  $c$  a la cohesión en tensiones totales.

Si suponemos que el ancho de la zona de transformación es despreciable, debe ocurrir llamando  $R$  al radio de la zona plastificada:

$$\left(\frac{R}{a}\right)^{nm} = \frac{q - c}{\sigma_a} \quad [45]$$

El aumento de volumen en la zona plastificada será entonces:

$$\Delta V = \int_a^R \lambda_m 2 \pi r^m \ln \left[ \frac{(1 - \text{sen } \phi) q}{\sigma_r} \right] dr \quad [46]$$

Sustituyendo en lugar de  $\sigma_r$  su valor sacado de [43] se obtiene:

$$\begin{aligned} \Delta V = & \frac{2 \pi}{m+1} \cdot \lambda_m \left[ \ln \frac{(1 - \text{sen } \phi) q}{\sigma_a} + \right. \\ & \left. + \frac{m n}{m+1} \right] (R^{m+1} - a^{m+1}) - \\ & - \pi \lambda_m R^{m+1} \ln \left(\frac{R}{a}\right)^{nm} \quad [47] \end{aligned}$$

(13) Jiménez Sañas, J. A. (1974): «Concepción y dimensionamiento de la sección del túnel». Simposio Nac. de Túneles, vol. 2, pp. 33-35.

(14) Jiménez Salas, J. A. (1983): Discusión a publicar en Géotechnique.

que teniendo en cuenta [45] pasa a ser:

$$\Delta V = \frac{2 \pi}{m+1} a^{m+1} \cdot \mu_m \quad [48]$$

siendo:

$$\begin{aligned} \mu_m = \lambda_m \left\{ \left[ \left( \frac{q - c}{\sigma_a} \right)^{2/nm} - 1 \right] \right. \\ \left. \left[ \ln \frac{(1 - \text{sen } \phi) q}{\sigma_a} + \frac{m n}{2} \right] - \right. \\ \left. - \left( \frac{q - c}{\sigma_a} \right)^2 \ln \frac{q - c}{\sigma_a} \right\} \quad [49] \end{aligned}$$

Con esto podemos calcular la convergencia. Por una parte, la zona elástica habrá experimentado una convergencia también elástica (ecuaciones 7 y 35) de modo que el radio  $R$  habrá pasado a ser  $R^*$ .

$$R^* = R \left( 1 - \frac{1 + \nu}{E} c \right) \quad [50]$$

Llamando  $a^*$  al radio del túnel una vez producida la convergencia tendremos:

$$\begin{aligned} a^* = \sqrt[m+1]{R^{*m+1} - a^{m+1} - \frac{\Delta V}{2 \pi / (m+1)}} = \\ = \sqrt[m+1]{R^{*m+1} - a^{m+1} (1 + \mu_m)} \quad [51] \end{aligned}$$

En las figuras adjuntas tenemos las curvas características, es decir, las convergencias de la sección de un túnel con radio inicial de 350 cm. para una diversidad de combinaciones de  $q$ , y presión interior  $\sigma_a$ . También hay algún ejemplo de variación de  $R_u$  y de  $\phi$ . Se indica también la variación del radio de plastificación.

Ahora bien, suponiendo que lo que se desea es un túnel con radio definitivo de 350 cm. será necesario recortar las tierras que han entrado dentro de este círculo, y colocar luego un revestimiento que resista la presión que se produce precisamente a esos 350 cm. de radio.

Se plantea entonces el problema de optimizar la convergencia permitida. Para ello hay que tener en cuenta dos valores: la presión que se ejercerá sobre el revestimiento y los metros cúbicos que habrá que recortar. Estos son, evidentemente, menos cuanto menor convergencia se

# CONDICIONES GEOTECNICAS DEL TUNEL BAJO EL ESTRECHO DE GIBRALTAR

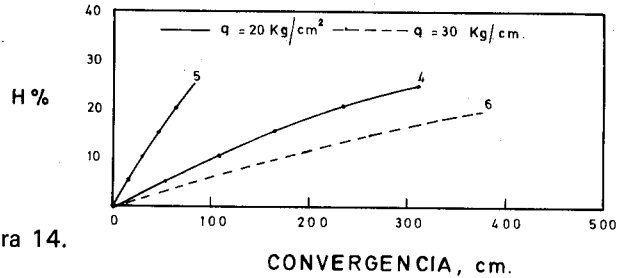
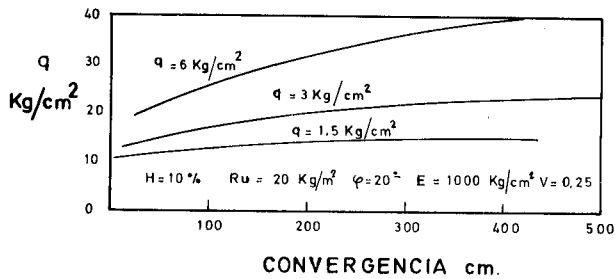
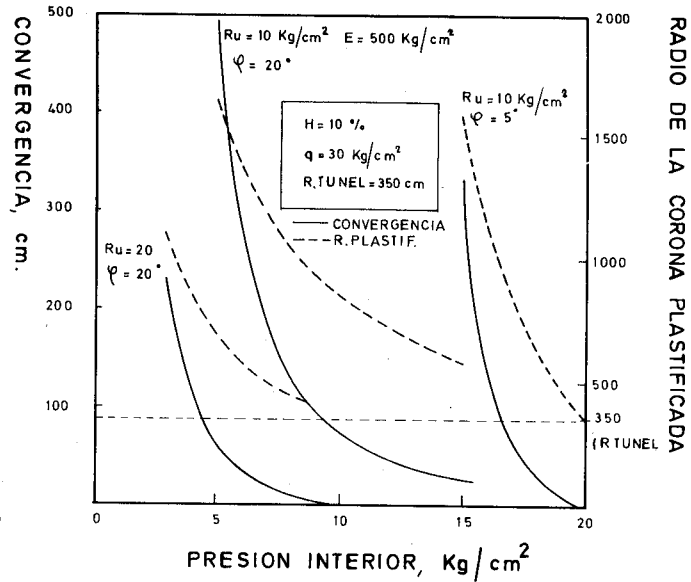
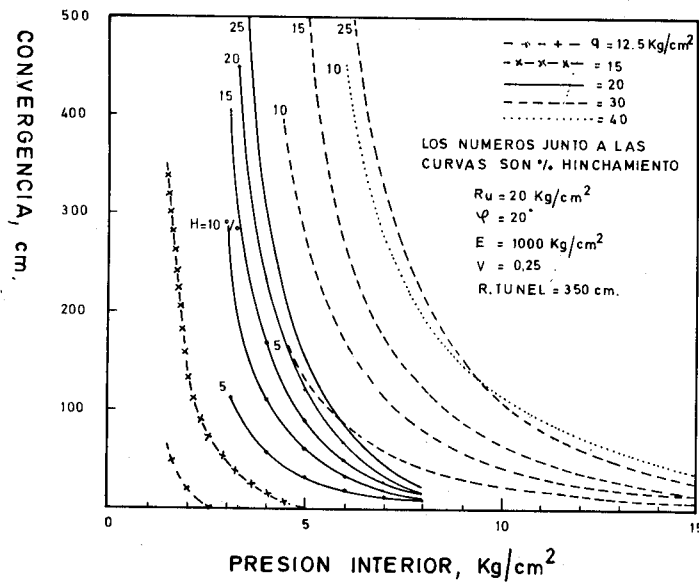


Figura 14.

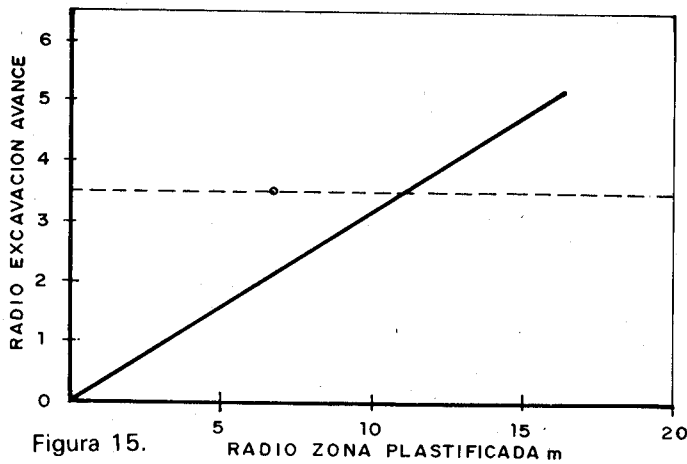


Figura 15.

permita, pero intuitivamente para ce que, en cambio, la presión será menor cuanto mayor sea la convergencia. Sin embargo, no es así, y existe un mínimo claro. La presión menor se obtiene permitiendo una convergencia que obliga a recortar un volumen que se aproxima al 40 por 100 de la sección del túnel.

Una nueva pregunta es: ¿Conviene, entonces, excavar el túnel inicialmente con 350 cm. de radio, para después recortarlo a la misma medida,

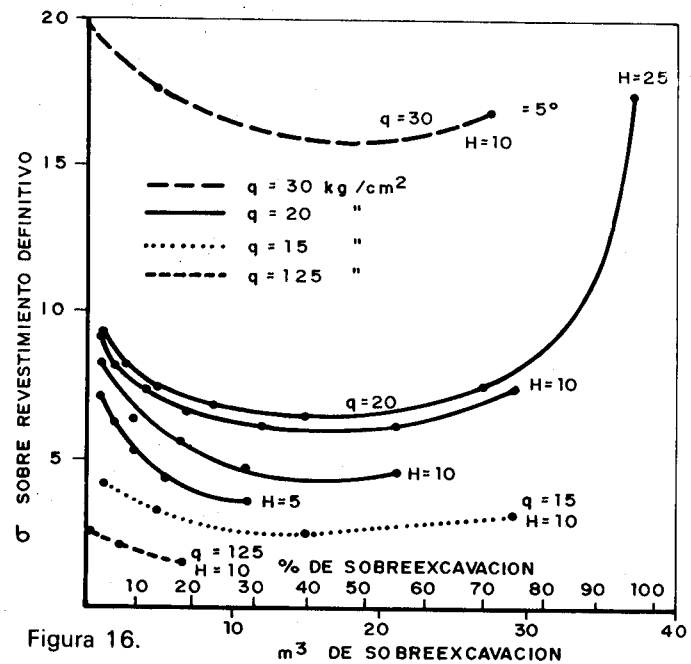
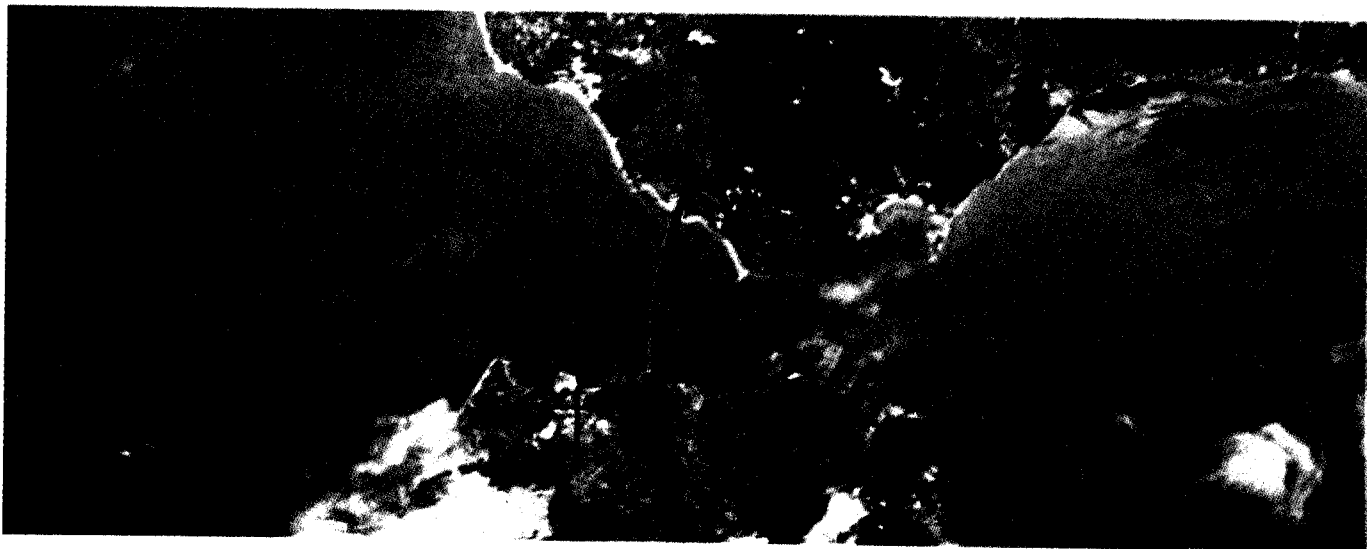


Figura 16.

o bien sería mejor excavarlo inicialmente con un radio mayor o menor?

De las ecuaciones planteadas resulta que la presión sobre el revestimiento definitivo es



prácticamente igual sea cual sea el radio de la excavación primitiva. El volumen total (excavación primitiva + recorte) será menor comenzando con un radio menor, y también será más económica la entubación de esta primera excavación. Resulta así que es conveniente comenzar, en terreno expansivo, con galería de avance en contra de lo que a veces se ha dicho. El radio plastificado final, es también menor.

### 3.4. Influencia de la trayectoria de tensiones

Estos resultados son, por otra parte, tan sólo indicativos. Se podría enfocar de otra manera el problema, suponiendo que existe una función que liga el hinchamiento que se ha permitido al terreno y su resistencia. Con esta hipótesis el problema queda indefinido. Es decir, hay infinitud de soluciones, que dependen de cómo se haya producido el hinchamiento.

Y hay que tener en cuenta que éste se desarrolla de modo muy complejo; inicialmente, en el frente, hay descompresión, que se traduce en tensiones capilares y, probablemente, desaturación. Luego, el agua accede desde el interior, pero, en régimen semisaturado, la permeabilidad es mucho menor y muy variable con el radio. Posiblemente, el anillo más interior se encuentra comprimido, debido a su escasa permeabilidad, por la presión hidrostática del agua y a esto puede deberse la «desescamación» de material relativamente seco que a veces se ob-

serva en estos túneles.

Otros enfoques teóricos, con variaciones más sustanciales, son también posibles. Por ejemplo, en la representación de Cambridge, un terreno expansivo puede representarse con superficies de fluencia piriformes, con ápice en el origen, y tales, que la tangente en el punto en que corta a la pirámide crítica sea divergente respecto al eje del tensor esférico. Una trayectoria que, incluso, no llegue a tocar a dicha pirámide, puede producir regresión a una superficie de fluencia de menor nivel, y es claro entonces la dependencia del estado final con la trayectoria seguida. Pero todo esto es materia de investigaciones futuras.

### 3.5. Procedimientos constructivos

Como ya se ha dicho, no existe un consenso universal acerca de si es más conveniente el ataque a sección completa o fraccionadamente. En todo caso, sí parece claro que hay que evitar producir concentraciones de tensiones en puntos diversos de la sección, ya que cada una de estas concentraciones puede desencadenar el hinchamiento de una cierta masa de suelo. Parece pues, que, si se hace ataque parcial, éste deberá ser único y más o menos en el centro de la sección, procediendo después a ensanches que conserven una cierta simetría axial.

Como hemos visto también, el permitir cierto hinchamiento reduce la presión definitiva sobre el revestimiento pero sólo hasta cierto punto

óptimo. Pasado el mismo, lo aumenta la decompresión, de todos modos, aumenta la permeabilidad y acelera el fenómeno. En ciertos casos, esto es muy notorio cuando se abren fisuras o diaclasas.

Según el estudio teórico que antes hemos hecho el control del hinchamiento puede hacerse con una entubación interior. Esto, sin embargo, puede resultar muy complicado y costoso, ya que, como hemos visto, las presiones son muy grandes, y muy superiores a las que estamos acostumbrados a manejar en la aplicación por ejemplo, del NAM. Ciertamente, es usual colocar, en estos casos de terrenos expansivos, entubaciones metálicas sumamente robustas. Quizá el caso extremo sea el de los túneles japoneses en el «jamongan», en donde se han utilizado marcos hechos de tubo de 216 mm. de diámetro y rellenos de hormigón. Dentro del tubo, se colocaba además una espiral de redondo de 16 mm. con paso de 32 mm. De esta forma se consigue un hormigón mezclado muy resistente, pero también muy resiliente. Estos elementos, ensayados, resisten 460 t. con 3 por 100 de deformación. Con cargas mayores, empiezan a fluir, pero tardan mucho en llegar a una rotura completa.

El túnel de Onitoge, de radio interior 3,16 m., se excavaba en dos mitades, primero la superior y luego la inferior, pero de forma que el decalaje fuese siempre inferior a cinco días. Inmediatamente después de la excavación, se colocaban los marcos indicados, cada 50 cm. y se rellenaban los huecos con gunita de 25 cm. de espesor. Más tarde se completaba el revestimiento con 60 cm. de hormigón.

Como antes hemos dicho, sin embargo, los túneles japoneses en el «jamongan» quizá constituyen un caso especial: es un terreno que ya se ha hidratado y que, por ello, está con unas tensiones internas muy grandes. En otros casos, el constructor puede beneficiarse de que el hinchamiento necesita, para producirse, la absorción de agua. Como estos terrenos suelen ser muy poco permeables, el fenómeno toma un cierto tiempo, lo cual puede evitar, o al menos aliviar, la entubación provisional. Aún en el caso del «jamongan», como acabamos de ver, es posible esperar cinco días.

En consecuencia, la aparición del hinchamiento se retarda si dificultamos el acceso del agua. En primer lugar, toda filtración deberá ser captada en tubería y evacuada sin que tenga contacto con el resto de la superficie del túnel. En los relatos de casos de hinchamiento, predominan los de levantamiento del fondo. Es cierto que esa es una zona en donde la decompresión es fuerte, y más si la sección es en herradura, pero también lo es el que suele estar mojada con las filtraciones.

Otra posible fuente de humectación es el propio aire del túnel. Whittke hace una indicación según la cual en un túnel de 8 m<sup>2</sup> se transportan diariamente de 6 a 10 m<sup>3</sup> de agua, una parte de los cuales puede ser absorbida por el terreno (15).

Sobre la velocidad de aparición de las presiones existen datos muy dispersos, como corresponde a los diversos mecanismos de producción del fenómeno. La hidratación de la anhídrita, por ejemplo, es lenta, mientras que el hinchamiento por absorción de agua de la arcilla es rápida. En el túnel de Bon Areg, en Marruecos, se hizo el experimento de inyectar agua en el trasdós, obteniéndose esta ley de producción de presiones:

$$p = 7 \times 10^{-4} \sqrt{t}$$

p es la presión en kg/cm<sup>2</sup> y t el tiempo en segundos. La presión se estabilizó al llegar a 3 kg/cm<sup>2</sup>, aunque se continuó midiendo durante doscientos sesenta días, y es de notar que la presión de hinchamiento que se había obtenido en los ensayos de laboratorio había sido 15 kg/cm<sup>2</sup>.

Esta discrepancia entre las medidas de laboratorio y las reales, siempre en el mismo sentido, se encuentra en otros varios casos, y se atribuyen a causas distintas, bien a que la hidratación en el terreno no es tan completa en el caso real que en el experimental, o que en la realidad el hinchamiento que se le deja tomar al terreno en el proceso de construcción, por diversos efectos constructivos, es mayor que el que se tiene en cuenta.

En algunos casos notables, ha ocurrido que

(15) Wittke, W.: Publ. n.º 6 de Inst. for Found. Eng. RWTH Aachen, 1978.

la perforación de un túnel en terrenos de esta clase, que se iba consiguiendo de manera controlada, se torna de pronto imposible, porque el hinchamiento se produce muy rápidamente. Esto puede tener su origen en la proximidad de un acuífero, como puede ser una caliza fisurada. En algunos casos, se ha conseguido dominar el problema inyectando cuidadosamente el acuífero, con lo que ha vuelto a conseguirse una velocidad de hinchamiento compatible con las operaciones de la construcción. En otros casos, como en el túnel del Belchen, el éxito ha sido relativo, pero siempre se ha notado alguna mejora. Señalamos que en este túnel el problema era de anhidritas y no de arcillas.

### 3.6. Conclusiones

Resumiendo lo anterior, señalemos que las presiones que tendría que resistir el revestimiento de un túnel en estos terrenos son muy grandes, aunque serían sólo una fracción de las que desarrollen muestras ensayadas en laboratorio.

La forma de la sección deberá tender a la circular. Puede resultar conveniente excavar a sección plana, pero en otros es necesario hacerlo por fases. Estas deberán inspirarse en la idea de un agujero que se ensancha simétricamente, y no de varias galerías en la periferia. Las

fases se sucederán una a la otra muy rápidamente, concluyendo la sección en plazo de días.

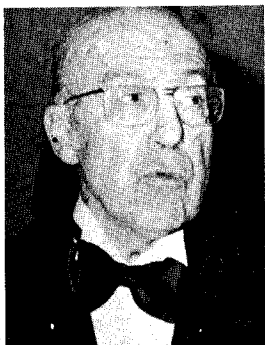
La entibación provisional tendrá que ser muy robusta, generalmente metálica, completada con gunita, para proteger el terreno del aire. La gunita no tiene probabilidades de ser suficiente por sí sola (falta experiencia sobre la gunita armada con fibra en casos como éste). En el caso de terrenos piritosos, la gunita es permeable al oxígeno y, además, puede ser atacada. Es preferible entonces la protección asfáltica.

El permitir al terreno un cierto hinchamiento disminuye la presión sobre el revestimiento definitivo, pero sólo hasta cierto punto. Hinchamientos mayores la aumentan.

Se ha presentado una teoría que permite llevar a cabo ciertas estimaciones sobre el hinchamiento óptimo, cuyos resultados deberán ser ajustados con observaciones directas.

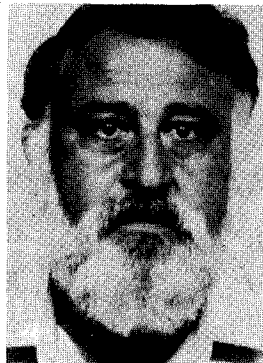
El control del hinchamiento se obtiene, en parte, mediante la entibación provisional, pero también evitando el contacto del terreno con el agua. Esta puede provenir de acuíferos, de filtraciones, y también del mismo aire que circula por el túnel. Las disposiciones que se tomen deberán atender a todas estas diversas posibilidades.

José Antonio Jiménez Salas



Es Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos, catedrático de «Geotecnia y Cimientos» de la Universidad Politécnica de Madrid (Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos), Académico de la Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales y presidente de la Sociedad Española de Mecánica del Suelo.

Alcibiades A. Serrano



Ingeniero de Caminos de la promoción de 1960. De 1960 a 1965 trabajó en la empresa constructora Entrecanales y Távora, S. A. Desde 1965 está en el Laboratorio de Carreteras y Geotecnia «José Luis Escario», del CEDEX, de donde es actualmente director. Es profesor adjunto de la asignatura de Geotecnia y Cimientos de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Madrid. En el curso 1968-1969 trabajó en Inglaterra con el grupo de Mecánica del Suelo de la Universidad de Cambridge en teorías de plasticidad de suelos. Ha sido asesor geotécnico de importantes obras públicas. Ha publicado numerosas comunicaciones científicas y colaborado en varios libros de Geotecnia.