

# Temperatura en los túneles<sup>(\*)</sup>

Por FERNANDO HACAR RODRIGUEZ

Ingeniero Técnico de Obras Públicas  
Especialidad Vías de Comunicación y Transporte (V.C.T.)

## GENERALIDADES

La temperatura que puede alcanzarse en el interior de un túnel puede deberse a la radiación del sol sobre la superficie terrestre, grado geotérmico, u otros motivos. Vamos a estudiar cada uno de estos tres puntos:

## CALOR TRANSMITIDO POR EL SOL A LA SUPERFICIE

La radiación del sol sobre la superficie de la tierra crea un flujo desde esa superficie hacia el interior, tal que, en la unidad de tiempo, el calor transmitido (por conducción) se expresa por la fórmula clásica (fig. 1):

$$q = K \cdot dS \cdot dT/dx$$

donde  $q$  es el calor que pasa de una a otra cara en la unidad de tiempo;  $dT = T_2 - T_1$  la diferencia de temperatura entre ambas caras;  $K$  el coeficiente de conductividad térmica del macizo;  $dT/dx$  el gradiente de temperaturas;  $dx$  la separación entre ambas caras.

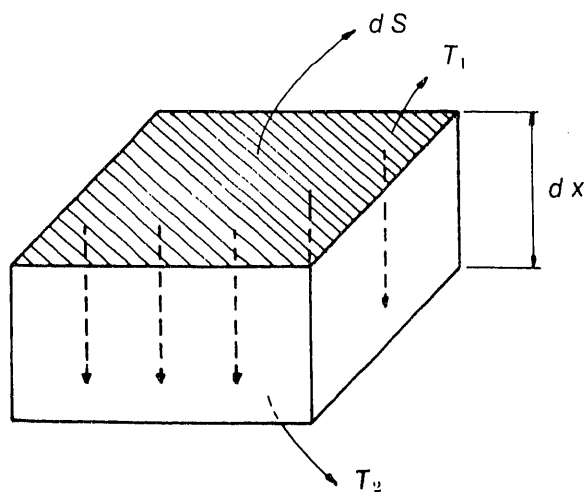


Fig. 1.—Transmisión de calor por conducción.

(\*) Se admiten comentarios sobre el presente artículo, que pueden remitirse a la Redacción de esta Revista hasta el 31 de mayo de 1979.

El coeficiente de conductividad térmica  $K$  depende de los constituyentes mineralógicos de la roca, así como de su orientación, volumen relativo de cada uno; porosidad y ordenación de los poros, humedad, etc. Sin entrar en más detalle, en la tabla 1 damos algunos valores de este coeficiente.

TABLA 1

Material	Coeficiente de conductividad térmica $J/m \cdot s \cdot ^\circ C$	Calor específico $J/gr \ ^\circ C$
Agua	0,58	1
Aire	0,023	—
Andesita	1,28 - 2,91	—
Basalto	1,25 - 2,93	0,63 - 0,89
Calcita	3,49 - 4,20	0,83
Caliza	0,98 - 2,30	0,63 - 0,97
Caolinita	0,88	0,92
Cobre	3,98	0,39
Cuarcita	6,28	0,84
Cuarzo	7,1 - 12,0	0,71
Diabasa	3,35	—
Dolomita	3,26	0,92
Gabro	2,0	—
Gneis	1,67 - 3,45	0,74 - 0,93
Granito	2,20 - 4,05	0,55 - 0,83
Halita	5,37	0,83
Hielo	2,33	2,30
Micas	0,70 - 0,73	—
Pirita	38,0	0,5

Estas variaciones de la temperatura exterior afectan hasta una profundidad de 20 a 25 m. En túneles con mayor cobertura que esa cifra, el problema no existe más que en las bocas y en las proximidades a las mismas.

## GRADO GEOTERMICO

El grado geotérmico,  $dx/dT$  (aumento de la profundidad para que la temperatura ascienda un grado), es la inversa del gradiente de temperatura; está comprendido entre 20 y 55 m. Su valor depende de múltiples factores; conductividad térmica de la roca, potencia y ordenación de los estra-

# TEMPERATURA EN LOS TUNELES

tos, situación del nivel freático y condiciones hidrológicas, fracturación y discontinuidades del macizo, topografía de la superficie del terreno, altitud del túnel, etc.

La temperatura máxima (tabla 2),  $T$  (°C), que puede alcanzarse en el interior de un túnel de longitud  $l$  (Km), con una cobertura  $C$  (m), y siendo  $T_m$  la temperatura media anual a la altitud del túnel es:

$$T = T_m + 4 + 0,00143 \cdot C \cdot l^{0,5}$$

TABLA 2

Túnel	Longitud (m)	Cobertura (m)	Temp. máx. (°C)	Grado geot (m)
Simplón	19.729	2.135	55,4	37
G. Apeninos	18.500	2.000	63	—
S. Gotardo	30,4	47	14.998	1.752
Lötschberg	34	45	14.605	2.500
Mont-Cenis	12.233	1.654	30	58,4
Arlberg	10.250	720	19	38,6

J. Stapff en los estudios del túnel de San Gotardo propone una expresión de la forma:

$$T = 0,01058 \cdot C + 6,4544 + (0,00011195 \cdot C^2 - 0,1517 \cdot C + 41,6593) \cdot l^{0,5}$$

con un error de  $\pm 2,6$ .

Donde  $T$  (°C) es la diferencia de temperatura entre el punto del túnel y el punto de la superficie situado en su vertical, y  $C$  (m) su cobertura.

## INFLUENCIA DE LA TOPOGRAFIA DEL TERRENO

La distribución de las isotermas en el terreno depende en gran parte de la configuración topográfica del mismo. En la figura 2 vemos que las isotermas siguen las ondulaciones del terreno; además, en las montañas el grado geotérmico es

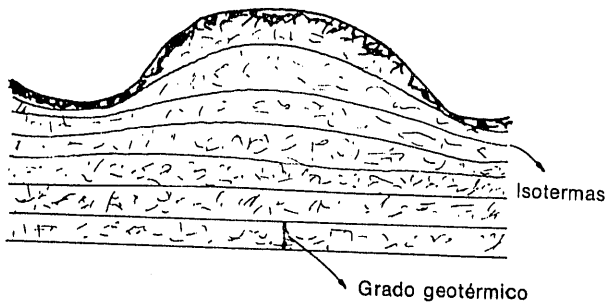


Fig. 2.—Influencia de la topografía de la superficie en la distribución de las isotermas.

mayor que en los valles (es decir, las isotermas están más separadas en una montaña que en un valle).

E. Thomas realiza un estudio en el que partiendo de una superficie de terreno ondulada (período  $a$ , amplitud  $A$ ), la temperatura  $T$  de un punto de coordenadas  $(x, z)$  es (fig. 3):

$$T = K_1 \cdot \ln \left( K + \sqrt{K^2 - 1} \right) + K_2$$

siendo  $K_1$  y  $K_2$  constantes de integración, y:

$$K = e^{\frac{z}{a}} + \left[ 1 - \left( 2 \cdot \cos \frac{2x}{a} - e^{-\frac{z}{a}} \right) \cdot e^{-\frac{z}{a}} \right]^{0,5}$$

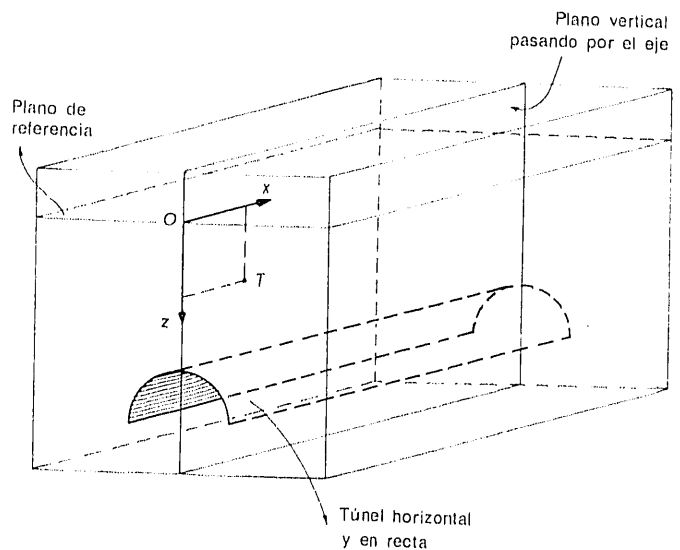


Figura 3.

Partiendo de estas expresiones puede demostrarse que en las elevaciones,  $x = (n + 1/2) a \cdot \pi$ , el grado geotérmico disminuye al aumentar la profundidad; en los valles,  $x = n \cdot a \cdot \pi$ , aumenta con la profundidad. El gradiente geotérmico normal (a suficiente profundidad) es:

$$\left( \frac{dT}{dz} \right)_{z \rightarrow \infty} = \frac{2 \cdot K_1}{a}$$

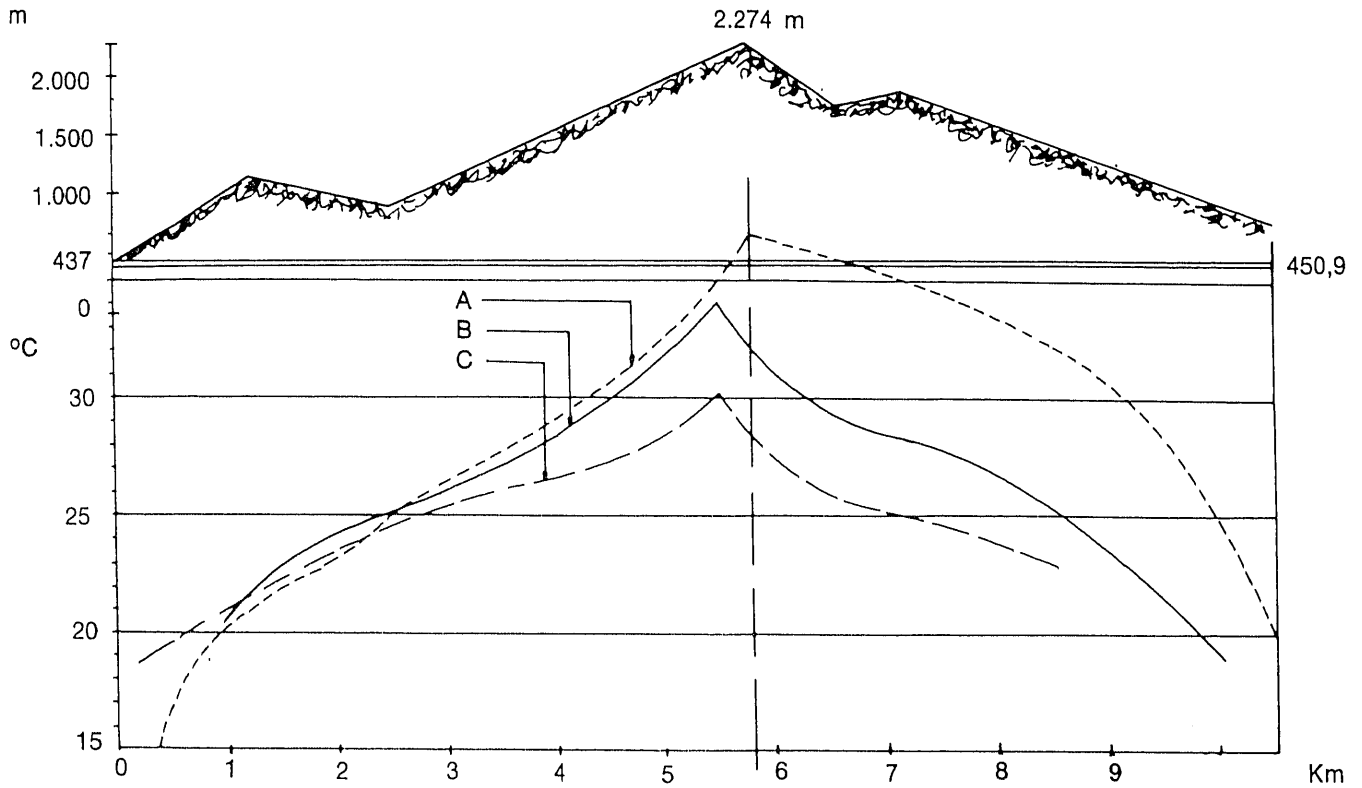
conocido el gradiente geotérmico normal,  $K_1$  queda determinada.

Siendo  $A$  la amplitud de la isoterma, puede ponerse:

$$T = K_1 \cdot \ln \frac{e^{\frac{z}{a}} + 1}{e^{\frac{z}{a}} - 1} + K_2$$

conocidos  $A$  y  $K_1$ ,  $K_2$  queda determinada.

# TEMPERATURA EN LOS TUNELES



- A) Temperatura prevista por Charles Andrea para roca.
- B) Temperatura medida en el frente durante la excavación.
- C) Temperatura medida después de retirar los escombros.

Fig. 4.—Temperaturas medidas en la galería Isère-Arc, Francia.

La aplicación de estos estudios fue hecha por Thoma y Koenigsberger. Comenzaron por definir "la línea de relieve", es decir, el perfil longitudinal del terreno a efectos térmicos (que no es el perfil longitudinal ordinario). Para ello, consideraron el efecto del terreno situado en la vertical del túnel, así como en una banda a ambos lados del eje y de una anchura determinada. El terreno así

considerado se divide en porciones paralelas y perpendiculares al eje del túnel. La línea de relieve se obtiene promediando, considerando que la porción central tendrá un efecto superior a las dos laterales.

Al perfil así obtenido se le adapta una curva senoide.

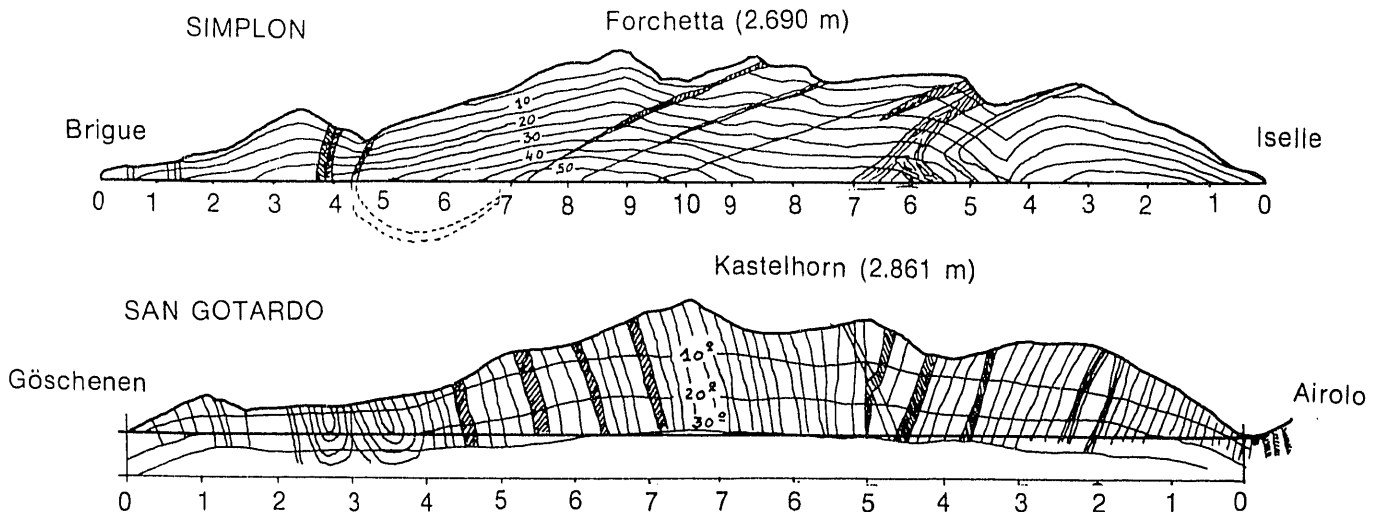


Fig. 5.—Geoisotermas en los túneles del Simplón y San Gotardo.

# TEMPERATURA EN LOS TUNELES

Así, ya está definida la forma de la superficie del terreno; veamos como se obtienen las isotermas.

Como punto de origen de las isotermas (punto O de la figura 3) se considera un plano a una cierta altitud, determinándose de la forma más aproximada (con sondeos, por ejemplo) la temperatura en los puntos del terreno a esa altitud.

Así, puede dibujarse ya una isoterma. En efecto, desde esos puntos anteriores ( $z = 0$ , temperatura conocida) y conocido el gradiente geotérmico normal se traza la isoterma. Para  $a \cdot \pi$  (período) se toma una longitud característica (entre dos puntos determinados del túnel) sin olvidar que las isotermas se adaptan, más o menos, al perfil del terreno (fig. 5).

Otras fuentes capaces de aumentar la temperatura en el interior del túnel y del terreno son: empleo de explosivos, reacción exotérmica de fraguado del hormigón, transformaciones químicas del terreno, bolsas de gases o petróleo; durante la explotación, el calor transmitido por el material móvil, rozamientos de todo tipo, etc.

## ESTUDIO TERMICO DE UN TUNEL

Sea una galería circular de radio  $R$  (fig. 6). Considerando el cilindro de espesor  $dr$  indicado en la figura, el calor que pasa de una a otra cara en la unidad de tiempo es:

$$q = 2 \cdot \pi \cdot r \cdot K \cdot \frac{dT}{dr}$$

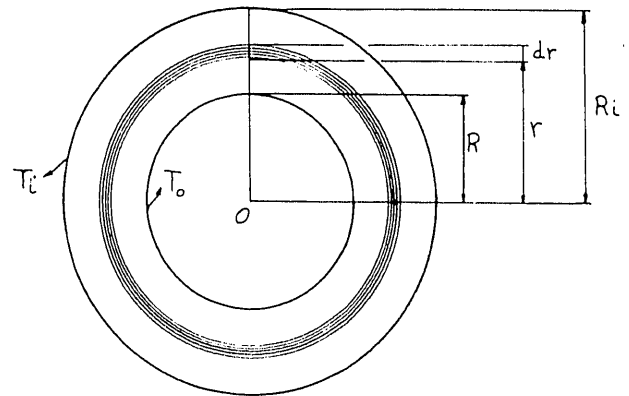


Figura 6.

Por otro lado, la ecuación diferencial de las isotermas es:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{K}{C} \left( \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial T}{\partial r} \right)$$

$C$  = calor específico de la roca.

En un estado estacionario, para lo cual tiene que transcurrir un tiempo suficientemente largo, es:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = 0, \text{ luego } \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial T}{\partial r} = 0$$

La solución de la ecuación anterior es  $T = K_1 \cdot \log_e r + K_2$ . Las constantes se determinan considerando la existencia de un radio de influencia de la galería,  $R_i$ , a partir del cual el efecto de

TABLA 3

$R = 1,60 \text{ m}$		$R = 2,80 \text{ m}$		$R = 3,20 \text{ m}$		$R = 6,60 \text{ m}$	
$t$ (días)	$R_i$ (m)	$t$ (días)	$R_i$ (m)	$t$ (días)	$R_i$ (m)	$t$ (días)	$R_i$ (m)
0,00	1,60	0,00	2,80	0,00	1,60	0,00	2,80
0,38	2,05	1,18	3,60	2,00	2,64	1,20	3,60
1,96	2,64	5,99	4,62	5,70	3,39	6,00	4,62
5,69	3,39	17,41	5,93	13,20	4,35	17,40	5,93
13,22	4,35	40,50	7,60	27,40	5,36	40,50	7,60
27,39	5,36	83,88	9,17	53,00	7,17	83,90	9,17
53,04	7,17	162,10	12,56	98,00	9,20	300,00	16,10
97,90	9,20	299,70	16,11	309,00	15,13	946,00	26,60
175,70	11,82	538,00	20,70	917,00	25,00	2.307,00	42,80
308,80	15,13	946,00	26,60	2.634,00	41,26	4.773,00	56,20
535,00	19,49	1.638,00	34,10	4.432,00	53,00	—	—
917,00	25,03	2.307,00	42,80	—	—	—	—
1.559,00	32,14	4.773,00	56,20	—	—	—	—
2.634,00	41,26	—	—	—	—	—	—
4.432,00	52,99	—	—	—	—	—	—

## TEMPERATURA EN LOS TUNELES

la misma es inapreciable. Así, la temperatura para  $r = R_i$  es la primitiva, sea  $T_i$ . La otra condición es suponer constante la temperatura en el interior del túnel, para  $r = R$  sea  $T = T_u$ . Con esto se tiene:

$$T = (T_i - T_u) \cdot \frac{\ln r - \ln R}{\ln R_i - \ln R} + T_u$$

luego la temperatura varía en función del radio.

Heerwagen da una fórmula que permite conocer el calor transmitido por el terreno al túnel,  $q$  (Cal/h), en función del tiempo  $t$  (días) para un túnel en que la temperatura interior es  $T_u$  (°C), la exterior (del radio de influencia) es  $T_i$  (°C) (tabla 3):

$$q = \frac{20 \cdot (T_i - T_u)}{\log \left( \frac{1,8^2}{R^2} \cdot t \right) - 0,158}$$

El mismo autor propone que el calor  $q$  transmitido por una galería de longitud  $l$  (m), siendo el avance de la excavación  $a$  (m/h), la temperatura original de la roca  $T_i$  (°C), y la máxima permitida dentro del túnel  $T$  (°C) es:

$$q = 100 \cdot l \cdot a \cdot (T_i - T)$$

*Ejemplo:*

Sean las características del túnel las siguientes:

Longitud: 10.000 m.

Sección del túnel: 40 m<sup>2</sup> ( $R = 3,6$  m.).

Se supondrá un avance medio de 8 ml/día.

El revestimiento irá siempre retrasado 300 m respecto al frente de la excavación.

Coefficiente de conductividad térmica de la roca:  $K = 3,5$  J/m · s · °C.

Temperatura máxima admisible en el interior del túnel:  $T = 22$  °C.

Supongamos que se ha calculado la temperatura prevista de la roca (según se vio al hablar del grado geotérmico) y es como se indica en la tabla 4.

Calcularemos el calor transmitido en la situación más desfavorable, es decir, cuando la excavación ha avanzado los 10 kilómetros.

A) Calor transmitido por el túnel ya revestido (10,0 — 0,3 = 9,7 Km).

La tabla 4 y las explicaciones adjuntas dan el resultado.

B) Calor transmitido por el túnel aún no revestido (300 m.).

$$q = 100 \cdot l \cdot a \cdot (T_i - T) = 100 \cdot 300 \cdot \frac{8}{24} \left( \frac{37,5 + 22}{2} - 22 \right) = 77.500 \text{ Cal/h.}$$

Calor producido = 1.815.470 + 77.500 = 1,9 millones Cal/h.

El calor total producido serían estos 1,9 más los producidos por el personal y maquinaria que estén dentro del túnel.

TABLA 4

Punto kilomét.	Temper. de la roca (1)	Tiempo en días (2)	Calor transmitido (3)	Promedio (4)
0	22	1.250	0	
1	24	1.225	42,7	21.350
2	27	1.000	101,3	72.000
3	32	875	188,5	144.900
4	35	750	236,3	212.400
5	40	625	310,9	273.600
6	40	500	310,9	310.900
7	40	375	310,9	310.900
8	35	250	236,3	273.600
9	26	125	82,4	159.350
9,7	23	37,5	21,8	36.470
10,0	22	0	0	—
TOTAL .....				1.815.470

(1) Temperatura de la roca obtenida según se vio al hablar del grado geotérmico.

(2) Tiempo que ha estado abierta la sección correspondiente a ese punto kilométrico,  $t = (100 - p. k.) \cdot 1000/8$ .

(3) Calor transmitido por el terreno al túnel:

$$q = \frac{20 (T_i - 22)}{\log t - 0,444}$$

(4) Calor medio transmitido en Cal/h; es igual al producto del calor medio entre dos secciones consecutivas por la distancia entre ellas (en metros).

ESFUERZOS TERMICOS

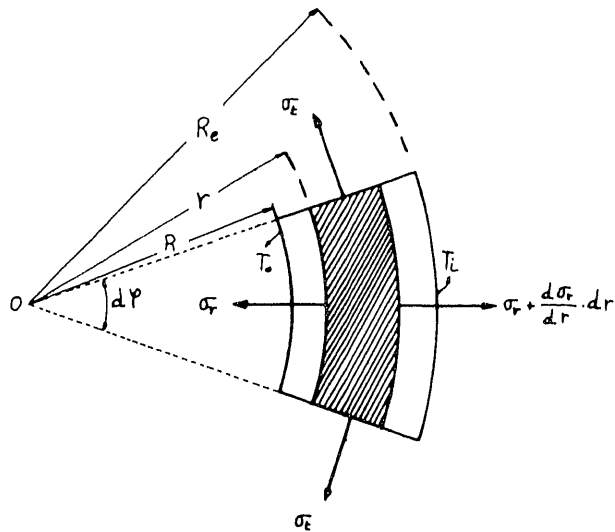
Sea un revestimiento cilíndrico (fig. 7) de material homogéneo y elástico, sometido a una diferencia de temperatura entre su superficie interior

y exterior, y de gran longitud comparada con el radio. Si suponemos que las tensiones radiales en su superficie interior y exterior son nulas,  $(\sigma_r)_{r=R_i} = (\sigma_r)_{r=R_e} = 0$ , las tensiones radiales,  $\sigma_r$ , y tangenciales,  $\sigma_t$ , a una distancia  $r$ , son:

$$\sigma_r = \frac{E}{1-\mu} \left( -\frac{1}{r^2} \int_R^r \alpha \cdot T \cdot r \cdot dr + \frac{r^2 - R^2}{r^2 (R_e^2 - R^2)} \int_R^{R_e} \alpha \cdot T \cdot r \cdot dr \right)$$

$$\sigma_t = \frac{E}{1-\mu} \left( \frac{1}{r^2} \int_R^r \alpha \cdot T \cdot r \cdot dr + \frac{r^2 + R^2}{r^2 (R_e^2 - R^2)} \int_R^{R_e} \alpha \cdot T \cdot r \cdot dr - \alpha T \right)$$

(Fórmulas clásicas para tubos de gran espesor.)



- $T_0$  = Temperatura interior.
- $T_i$  = Temperatura exterior.
- $R$  = Radio interior.
- $R_e$  = Radio exterior.
- $\alpha$  = Coeficiente de dilatación de la roca.
- $E$  = Módulo de elasticidad.
- $\mu$  = Coeficiente de Poisson.

Figura 7.

Si la temperatura se expresa en función de  $r$ , las tensiones quedan determinadas.

Si la variación es de tipo logarítmica:

$$T = (T_i - T_0) \frac{\ln r - \ln R}{\ln R_e - \ln R} + T_0$$

que sustituido en las anteriores permite conocer  $\sigma_r$  y  $\sigma_t$ .

J. A. Talobre hace un interesante estudio del

problema que nos ocupa. Consideremos el túnel como un cilindro atravesando un medio indefinido, elástico y homogéneo. Según sabemos, la temperatura en un punto a la distancia  $r$  es:

$$T = (T_i - T_0) \frac{\ln r - \ln R}{\ln R_i - \ln R} + T_0$$

También hemos dicho que el gradiente de temperatura,  $dT/dx$ , está comprendido entre 1/55 y 1/20. A una distancia  $r = R_i$  puede ponerse:

$$\left( \frac{dT}{dr} \right)_{r=R_i} = \left( \frac{T_i - T_0}{\ln R_i - \ln R} \cdot \frac{1}{r} \right)_{r=R_i} = \frac{T_i - T_0}{\ln R_i - \ln R} \cdot \frac{1}{R_i} = \frac{1}{50}$$

por lo tanto:

$$\frac{dT}{dr} = \frac{1}{50} \cdot \frac{R_i}{r}$$

hemos tomado como gradiente de temperatura 1/50.

Conocida la temperatura en función del radio, tras expresar las ecuaciones de deformación del elemento así como el equilibrio de un elemento infinitesimal (fig. 7), se llega a:

$$\sigma_r = M \cdot r^\alpha + N \cdot r^\beta - E \cdot \alpha \cdot \frac{R_i}{50}$$

$$\sigma_t = M \cdot \alpha \cdot r^\alpha + N \cdot \beta \cdot r^\beta$$

$$\sigma_r = M \cdot (1 + \alpha) \cdot \mu \cdot r^\alpha + N \cdot (1 + \beta) \cdot \mu \cdot r^\beta - \mu \cdot \frac{E \cdot \alpha \cdot R_i}{50} + E \cdot \alpha \cdot T$$

# TEMPERATURA EN LOS TUNELES

$\alpha$  y  $\beta$  son las soluciones de la ecuación  $z^2 + z - \frac{1}{1-\mu} = 0$ .

Las constantes de integración se determinan considerando que:

$$(\sigma_r)_{r=R} = 0 \quad \text{y} \quad (\sigma_r)_{r=R_i} = -(\sigma_t)_{r=R_i}$$

Para terminar, la deformación radial  $u$  se obtiene a partir de:

$$\epsilon_r = \frac{u}{r} = \frac{\sigma_r}{E} - \frac{\mu}{E} (\sigma_r + \sigma_t) - \alpha \cdot T$$

*Ejemplo:*

Sean los siguientes datos:

$$R = 1,5 \text{ m.}$$

$$T_i - T_{ii} = 6 \text{ }^\circ\text{C.}$$

$$\mu = 0,15.$$

$$E = 3,5 \cdot 10^{10} \text{ Kg/cm}^2.$$

$$\alpha = 0,6 \cdot 10^{-5} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}.$$

$$dT/dr = 1/50.$$

Con lo que hemos visto la solución es inmediata:

$$\frac{T_i - T_{ii}}{\ln R_i - \ln R} \cdot \frac{1}{R_i} = \frac{1}{50}, \text{ se deduce } R_i = 80 \text{ m}$$

$$z^2 + z - \frac{1}{1-\mu} = 0, \text{ las raíces son } \alpha = 0,69,$$

$$\beta = -1,69.$$

Con estos valores de  $\alpha$  y  $\beta$  es:

$$\sigma_r = M \cdot r^{0,69} + N \cdot r^{-1,69} - E \cdot \alpha \cdot \frac{R_i}{50}$$

$$\sigma_t = M \cdot 0,69 \cdot r^{0,69} - N \cdot 1,69 \cdot r^{-1,69}$$

Las condiciones de contorno  $(\sigma_r)_{r=R_i} = 0$  y  $(\sigma_r)_{r=R} = -(\sigma_t)_{r=R}$  permiten conocer  $M$  y  $N$ , siendo estos valores  $M = 3,36 \cdot 10^1 \cdot 0,02880$  y  $N = 3,36 \cdot 10^1 \cdot 1,90866$ .

Así, las tensiones radial y tangencial en  $\text{Kg/cm}^2$  son:

$$\sigma_r = (0,02880 \cdot r^{0,69} + 1,90866 \cdot r^{-1,69} - 1) \cdot 3,36$$

$$\sigma_t = (0,01987 \cdot r^{0,69} - 3,22564 \cdot r^{-1,69}) \cdot 3,36$$

$r$	$\sigma_r$	$\sigma_t$
1,5	—	— 5,37
5,0	— 2,64	— 0,51
8,5	— 2,76	0,00
10,0	— 2,76	0,11
20,0	— 2,55	0,46
30,0	— 2,33	0,66
40,0	— 2,11	0,83
50,0	— 1,91	0,98
60,0	— 1,72	1,12
70,0	— 1,54	1,24
80,0	— 1,37	1,37

En la pared interior,  $r = R = 1,5 \text{ m}$  es  $\sigma_r = 0$  y  $\sigma_t = -5,37 \text{ Kg/cm}^2$  (tracción).

## BIBLIOGRAFIA

- ANDREAEE, C.: "Les grands souterrains transalpins". Parte 4(c) y 5(b). S. A. Leeman Frères. Zurich, 1948.
- GALABRU, P.: "Cimentaciones y túneles". Cap. XLIX. Reverté. Barcelona, 1965.
- JACOBSON, M.: "Technique des travaux". Cap. VIII (I,4 y VI,3). Librairie Polytechnique Ch. Béranger. Paris, 1955.
- PEQUIGNOT, C. A.: "Tunnels and tunnelling". Cap. 4. Hutchinson. Londres, 1963.
- RZHEVSKY, V. y NOVIK, G.: "The physics of rocks". Cap. IV. Mir. Moscú, 1971.
- SZECHY, K.: "Traité de construction des tunnels". Cap. 2. Dunod. Paris, 1970.
- TALOBRE, J. A.: "La mécanique des roches". Cap. 18(A). Dunod. Paris, 1967.
- TIMOSHENKO, S.: "Resistencia de materiales". Tomo 2. Capítulo V. Espasa-Calpe. Madrid, 1950.
- WAHLSTROM, E. E.: "Tunneling in rock". Cap. 6. Elsevier. Amsterdam, 1973.