~~5.02~~
6.15

ÁREA: B

MÓDULO: DISEÑO Y PROYECTO DE TÚNELES

SOSTENIMIENTOS EN TERRENOS EXPANSIVOS.
~~SOSTENIMIENTOS EN TERRENOS SALINOS Y KARSTIFICABLES~~

Ponente: José Mª Rodríguez Ortiz
ICCP
Catedrático de la UPM

Día: 10/04/07

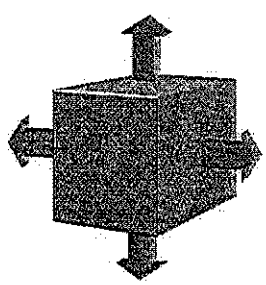
Hora: 16:00 A 18:00

MASTER DE TUNELES Y
OBRAS SUBTERRANEAS
2007

TUNELES EN TERRENOS EXPANSIVOS

José Mª Rodríguez Ortiz
Dr. Ingeniero de Caminos

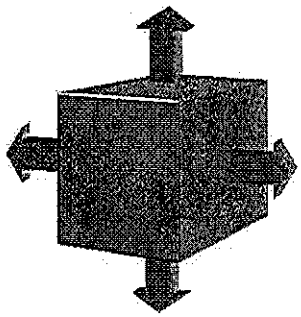
Hinchamiento- Aspectos esenciales



- El hinchamiento se manifiesta en todas las direcciones
- Son expansivas las arcillas de alta plasticidad de base montmorillonítica y las anhidritas, así como algunas margas, lutitas, pizarras arcillosas, etc.
- El hinchamiento puede producirse por absorción de agua, descarga, formación de cristales, etc.
- El hinchamiento puede manifestarse durante años

Hinchamiento-Aspectos esenciales

- La construcción de un túnel altera el equilibrio fisico-químico del terreno



➡ La descarga creada por la excavación provoca
  - Adsorción de agua en la estructura molecular de los minerales arcillosos (expansión osmótica)
  - Transformación de la anhidrita en yeso
  - Degradación estructural

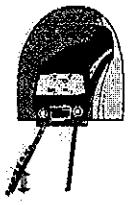
➡ Iniciación de un proceso de hinchamiento variable con el tiempo

---

Efectos prácticos

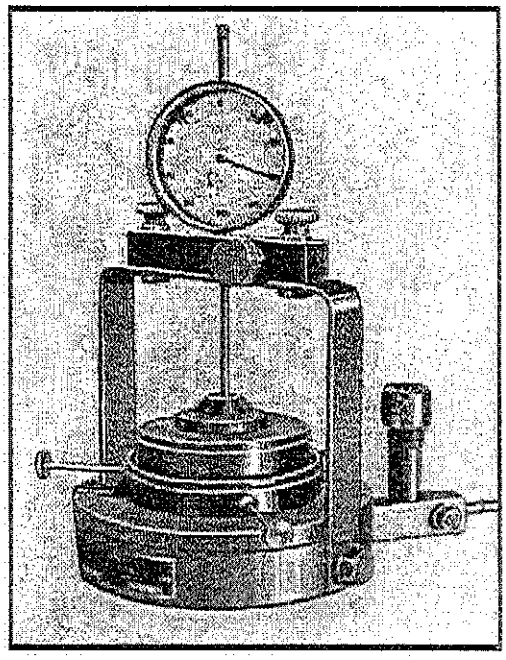
- Daños estructurales en revestimientos por combinación de hinchamiento y compresión

- Reducción de gálibo



Ensayos de caracterización

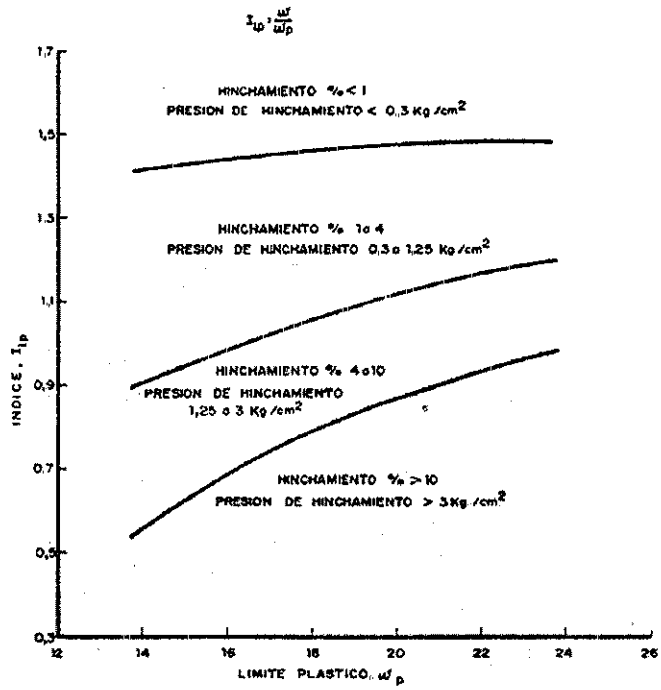
- Mineralogía
- Límites de Atterberg (w_L,w_P,w_S)
- Presión de hinchamiento e hinchamiento libre
- Ensayo Huder – Amberg
- Rock swelling tests
- Ensayo de Lambe
- Determinación de módulos en triaxial



I_P	ε_g (%)	Potentiel de gonflement
0 - 10	0 - 1,5	Faible
10 - 20	1,5 - 5	Moyen
20 - 35	5 - 25	Elevé
> 35	> 25	Très élevé

Relación entre el hinchamiento libre y el índice de plasticidad

(Seed et al., 1962)



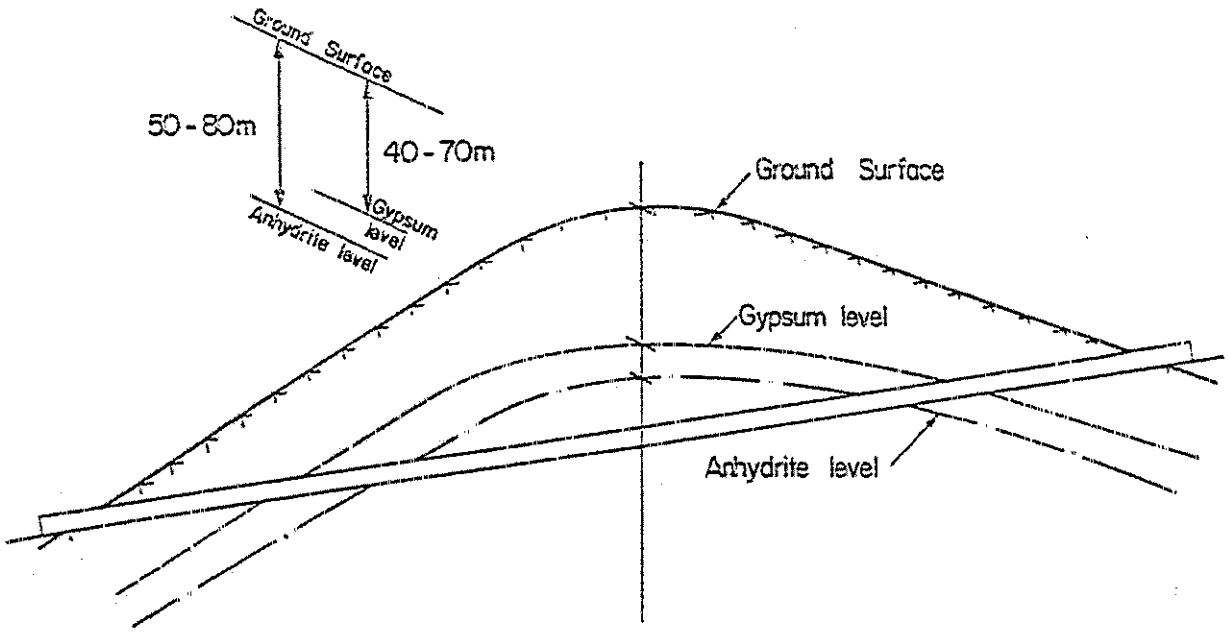
RELACION ENTRE EL LIMITE PLASTICO Y LA EXPANSIVIDAD (Cuellar, 1978)

La transformación química de la anhidrita en yeso se produce con la siguiente variación de volumen específico :

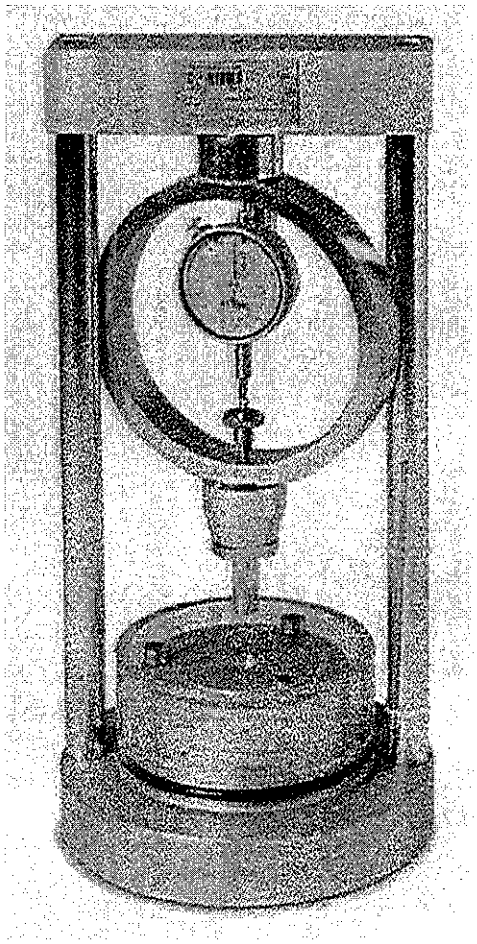
	$CaSO_4$	+ $2\,H_2O$	($CaSO_4$, $2H_2O$)
masa :	136g	36g	172g
volumen de solidos :	46 cm^3	36 cm^3	74 cm^3

$$\varepsilon_{vol} = -\frac{\Delta V}{V} = -\frac{74-(46+36)}{82} \times 100 = 9{,}6\ \%$$

$$\varepsilon_{vol} = -\frac{\Delta V}{V} = -\frac{74-46}{46} \times 100 = -61\ \%$$



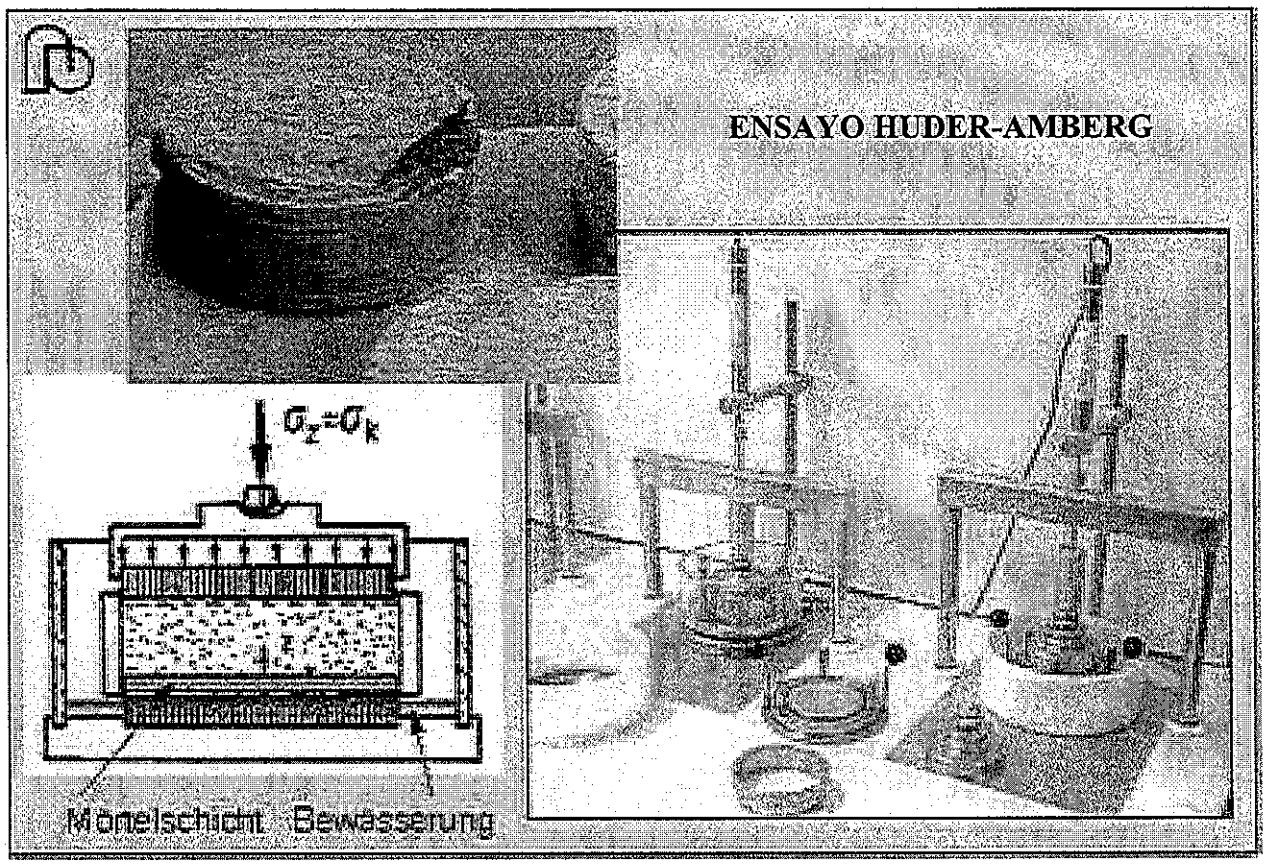
Profundidades de equilibrio del yeso y la anhidrita (Steiner, 1993)

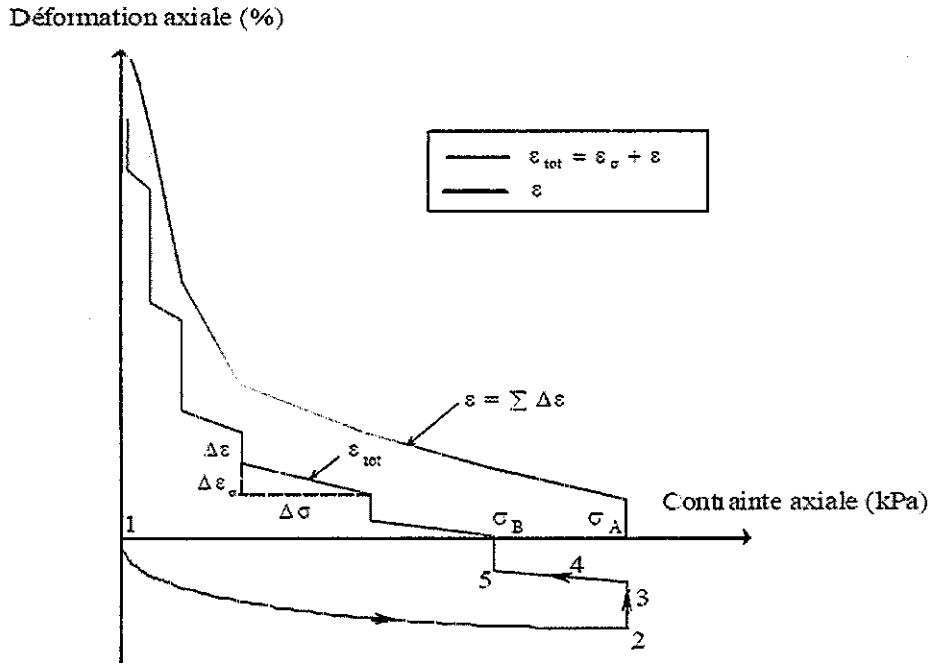


Índice Lambe (kg/cm²)	Expansibilidad equivalente
< 0,8	No crítica
0,8 – 1,5	Marginal
1,5 – 2,3	Crítica
> 2,3	Muy crítica

Condiciones de partida
húmedas o secas

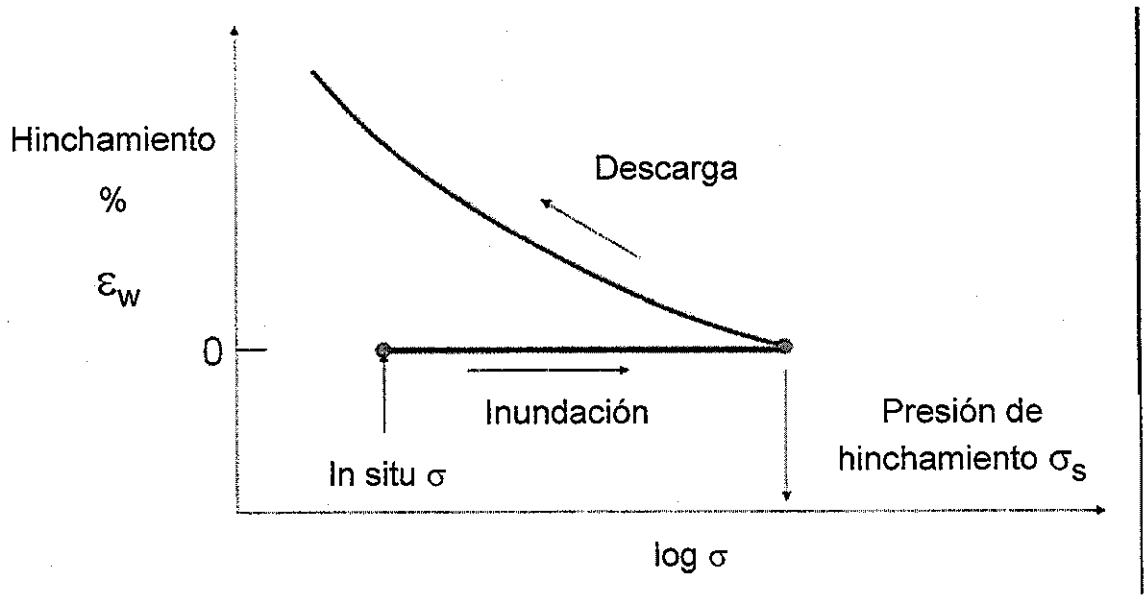
Ensayo de Lambe

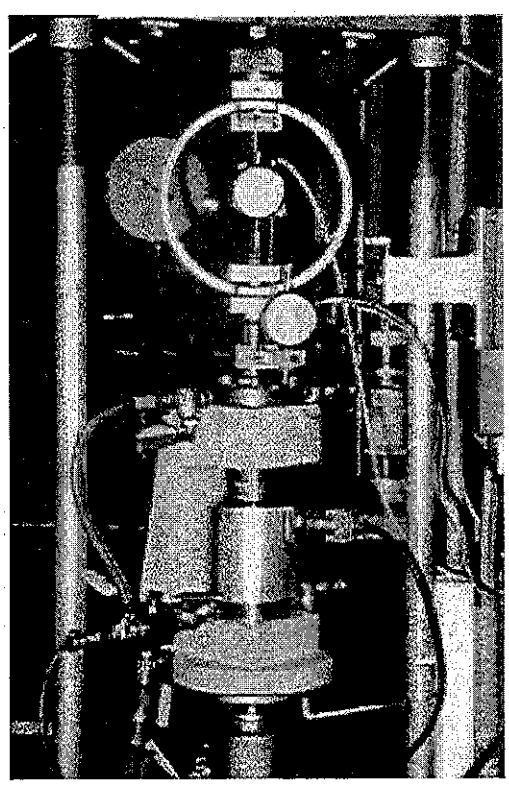




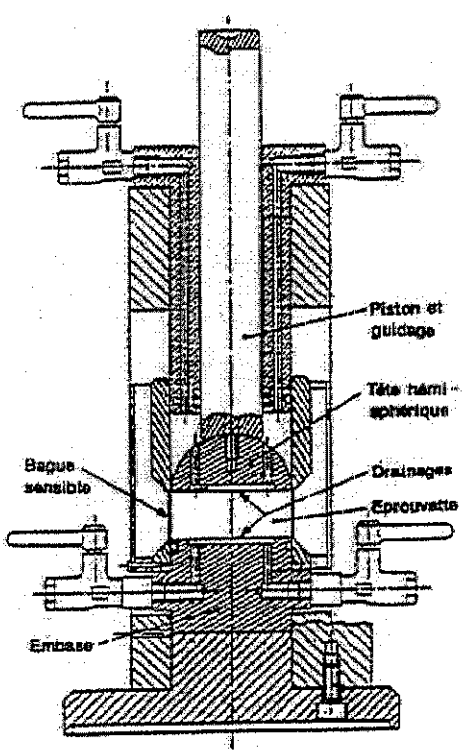
Ensayo tipo Huder-Amberg de la ISRM (1989)

Presión de hinchamiento – Hinchamiento libre



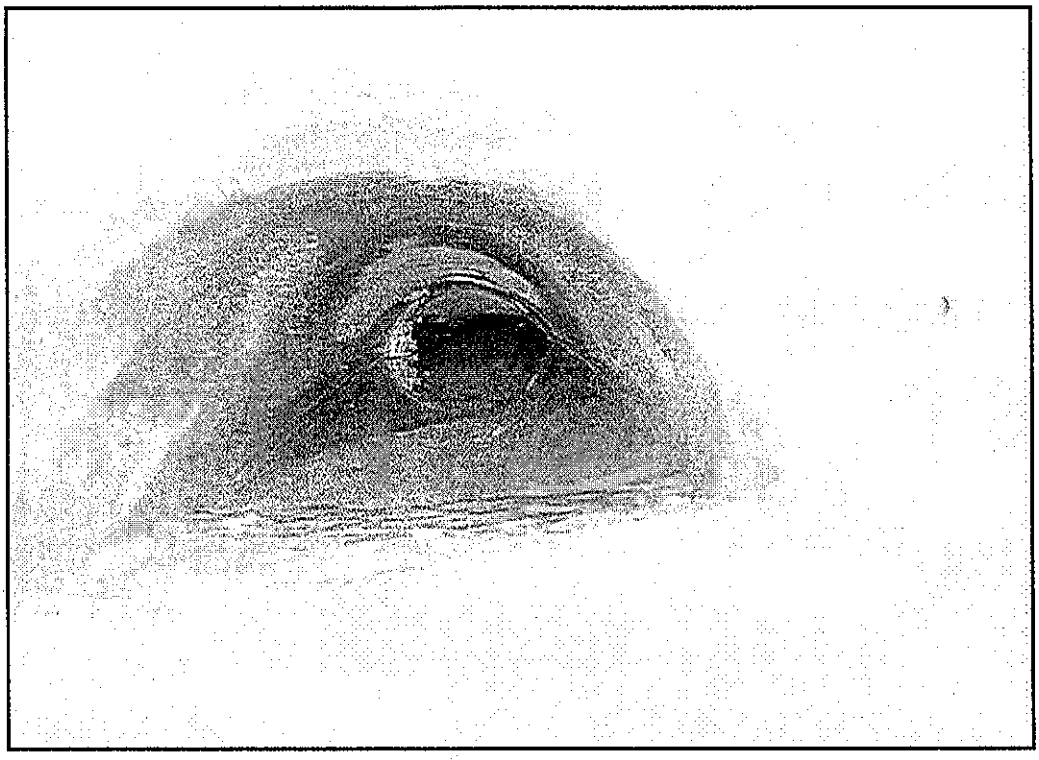


(a)



(b)

Vista (a) y sección (b) del edómetro "Ko" de alta presión



Túnel TT20 – Inundación y levantamiento de soleras

Tunnel TT20 – Presiones de hinchamiento

Según los ensayos realizados por Dériaz en 1989, las presiones desarrollables bajo la solera serían :

1. Por hinchamiento del terreno inmediato a la solera :

   Esp. de solera 0.40 m : 22-30 kN/m2

   Esp. de solera 0.50 m : 30-40 kN/m2

2. Por hinchamiento del terreno situado a 1,50 m bajo la solera:

   Esp. de solera 0.40-0.50 m : 36-56 kN/m2

Dimensionamiento de la solera: espesor 50 cm, luz 4 m

Carga en la lámina drenante Delta: env. 20 KN/m2

Momento de cálculo Md = 60 kNml

Sección de armaduras: 378 mm2/ml

o sea 1 ϕ 10 cada 20 cm

Tunnel TT20 – Presiones de hinchamiento

Subpresión (Arquímedes) :

Para un ancho de 10 m: P = 1000 x 10 x 10 = 100 kN/m2

La presión de hinchamiento desarrollable en las margas y aceptable por la contrabóveda se evalúa en las hipótesis siguientes: :

- solera plana sin armar de espesor 0.4 a 0.5 m
- resistencia a tracción del hormigón: 2 N/mm2
- distribución de presiones de tipo triangular

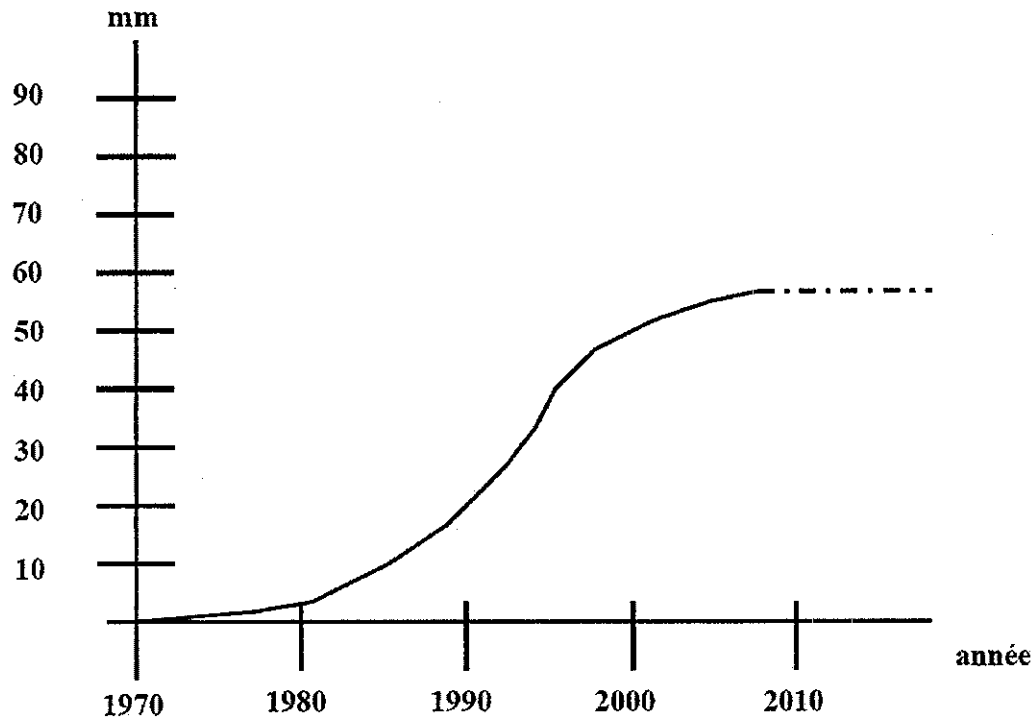
Para un espesor de solera de 0.40 m : 50 kN/m2

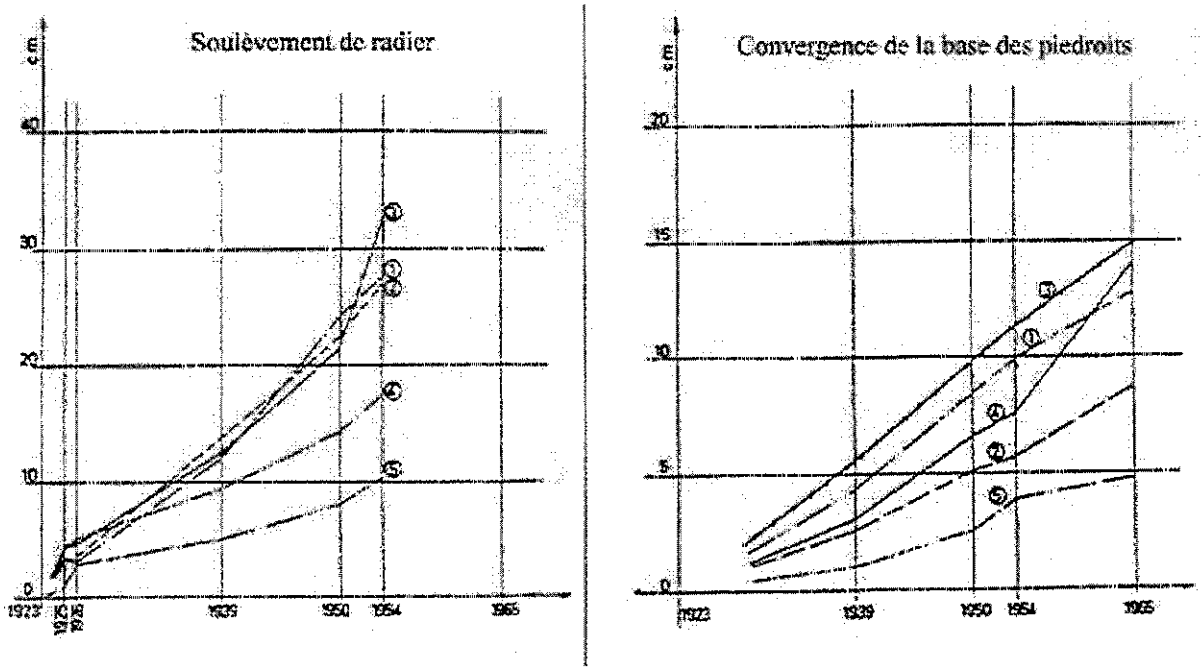
Para un espesor de solera de 0.50 m : 74 kN/m2

LA EXPANSIVIDAD ES UN FENOMENO DIFERIDO

SON FRECUENTES TIEMPOS DE ESTABILIZACION SUPERIORES A 10 AÑOS

Túnel TT20 – Levantamientos del eje de la solera con el tiempo





1 - Marnes (Tertiaire) 2 - Anhydrite 3 – Molasse marneuse (Tertiaire) 4 – Argiles Opalinus 5 – Marnes (Lias)

Medidas de desplazamientos (Túnel de Bözberg)

MODELOS PARA ESTUDIOS DE HINCHAMIENTO EN TUNELES

- Grob (1972)
- Einstein y Bischoff (1976)
- Wittke (1979, 1990, etc.)
- Kovari, Amstad y Anagnostou (1987)
- Gysel (1987)
- Fröhlich (1989)
- Barla, etc.

Modelos constitutivos (t = ∞)

Ojo: No deben utilizarse modelos de dilatación térmica

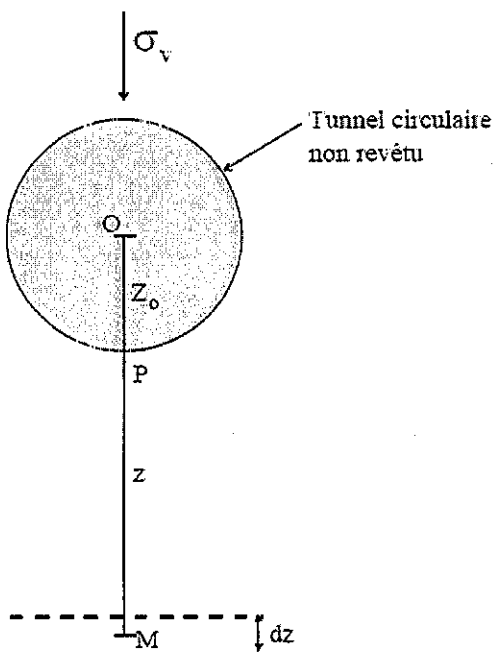
Modelos más utilizados:

- Mediante ensayos tipo Huder & Amberg:
  - Se obtiene una relación logaritmica 1D entre la presión y la deformación de hinchamiento final (Grob,1972)
- Ampliación a 3D (Wittke-Gattermann 1998, Kiehl,1990):
  - *"Las deformaciones principales de hinchamiento dependen de la tensión principal normal media"*

MODELOS CONSTITUTIVOS

- Objetivos:
  - Estimar las convergencias del túnel y las presiones (→ esfuerzos) sobre el sostenimiento-revestimiento.
  - Utilizar pocos parámetros "básicos" que puedan ser calibrados a partir de ensayos de laboratorio o medidas in-situ
  - Poder predecir el desarrollo del hinchamiento (tensiones y deformaciones) a lo largo del tiempo
  - Tratamiento en 3D o pseudo-3D

Cálculo del hinchamiento - Método de Grob



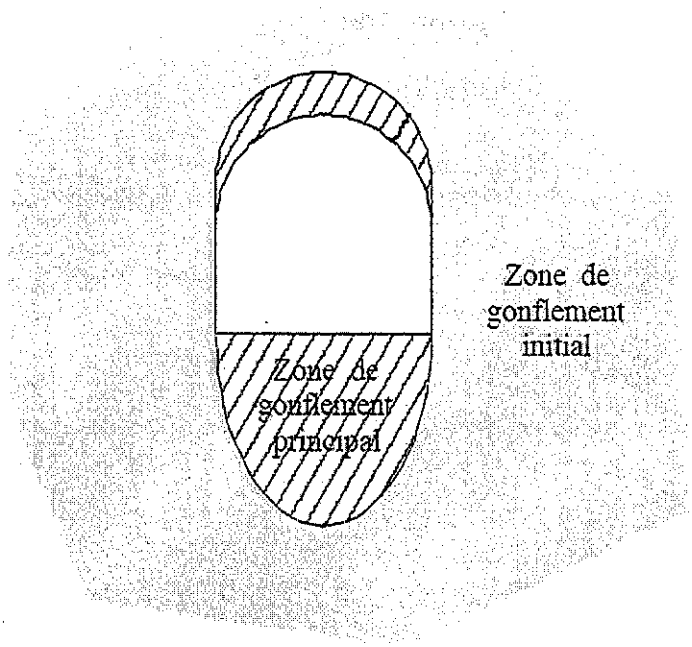
Hipótesis :

a) Grob supone que cada rebanada horizontal de terreno (dz) se encuentra en las mismas condiciones que en el edómetro, es decir :

-no hay deformación horizontal,

- la tensión vertical, a la profundidad z, después de excavar, (z) σ_v , es constante en todo el espesor dz de la rebanada de terreno.

b) La presión de hinchamiento del material σ_g es igual a la tensión vertical inicial (geostática) (z) σ_{vo} antes de excavar, es decir, la presión de hinchamiento es proporcional a la profundidad.

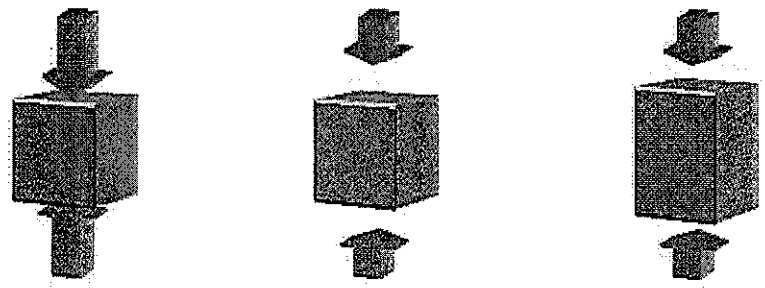


Se intenta expresar el hinchamiento en función del estado tridimensional de tensiones

Zonas de hinchamiento (Einstein y Bischoff, 1976)

Aproximaciones numéricas –Modelo 1D

- Caso 1-D: Descarga bajo tensión constante



Time < 0
loading

Time = 0
unloading

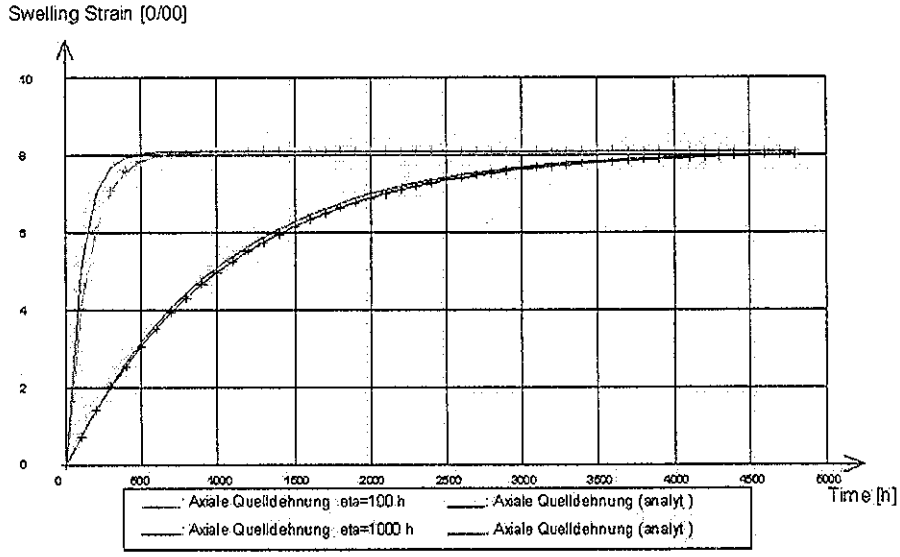
Time = t
swelling strain
evolution

Cálculos numéricos – Ejemplo 1D

Se deduce de lo anterior la siguiente solución analítica:

$$\varepsilon_q(t) = \int_0^t \dot{\varepsilon}_q \, d\tau = \int_0^t \frac{1}{\eta}\left({}^{\infty}\varepsilon_q - \varepsilon_q\right) d\tau$$

$$\varepsilon_q(t) = {}^{\infty}\varepsilon_q \left(1 - e^{-t/\eta}\right)$$

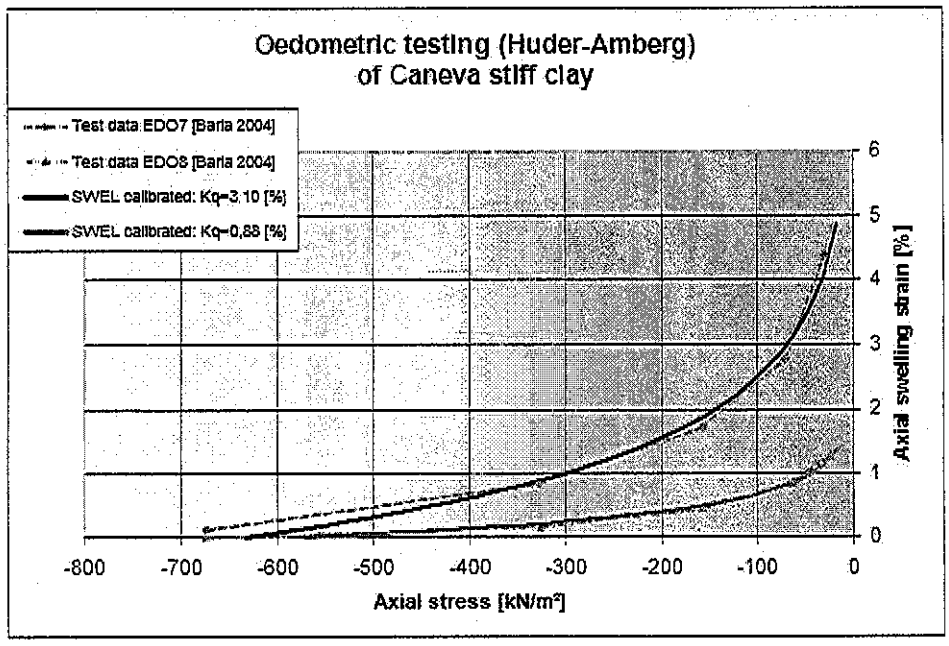


Identica a la relación 1D propuesta por Kiehl (1990):

$$\varepsilon_q(t) = \underbrace{-k_q \cdot \log\left(\sigma/\sigma_0\right)}_{{}^{\infty}\varepsilon_q} \cdot \left(1 - e^{-t/\eta}\right)$$

Cálculos numéricos - Calibración

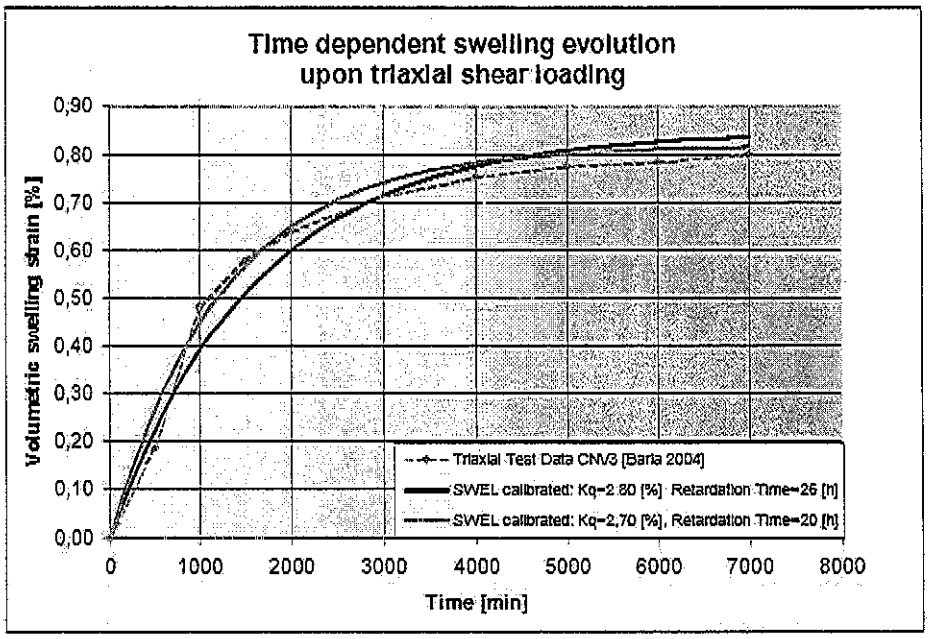
Módulo de hinchamiento – Ajuste a los resultados edométricos Caneva Stiff Clay



Test-data taken from:
Barla M 1999. *Tunnels in Swelling Ground – Simulation of 3D Stress Paths by Triaxial Laboratory Testing* PhD Thesis Politecnico di Torino Italy

Calculos numéricos - Calibración

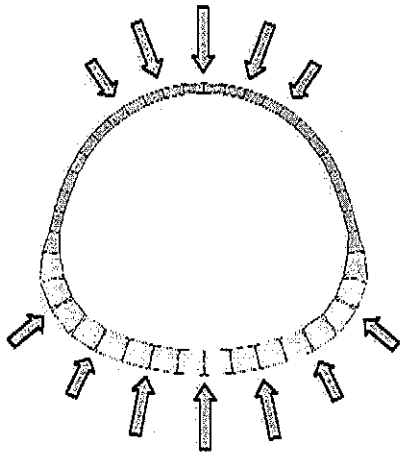
Evolución del hinchamiento con el tiempo. Ajuste a resultados del triaxial - Caneva Stiff Clay

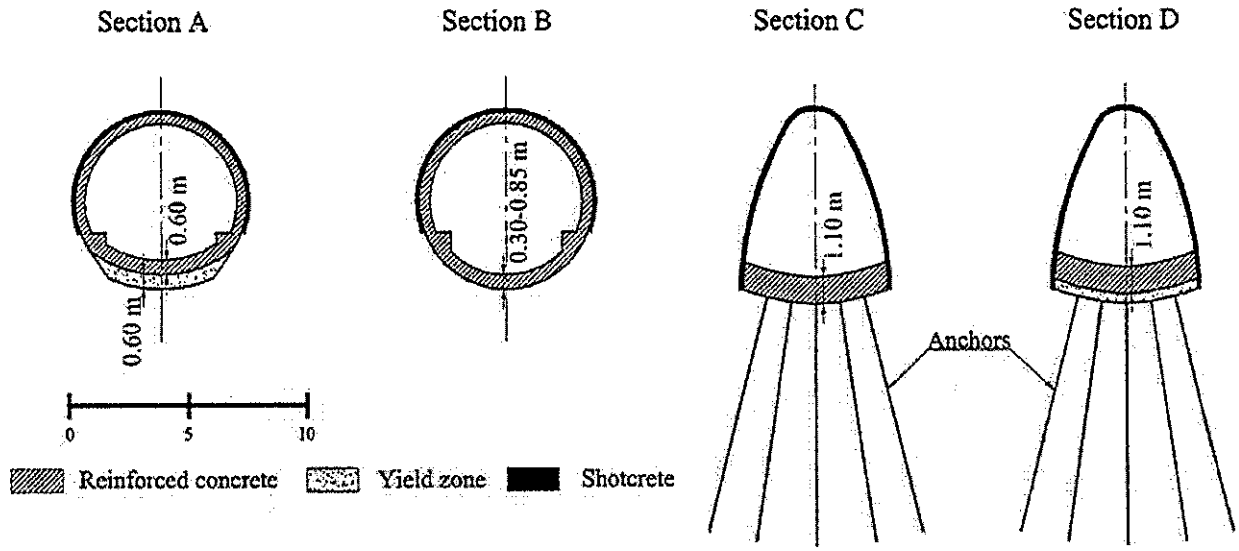


Test-data taken from:
Barla M 1999. *Tunnels in Swelling Ground – Simulation of 3D Stress Paths by Triaxial Laboratory Testing*. PhD Thesis Politecnico di Torino Italy

Hinchamiento – Efectos prácticos

- La expansión del suelo se ve limitada por los sostenimientos
- Se generan importantes presiones de hinchamiento en solera por descarga, decompresión y acumulación de agua por drenaje, ayuda a la perforación, etc.





Soluciones ensayadas en la galería de investigación de Freudenstein (Wittke-Gattermann, 2000)

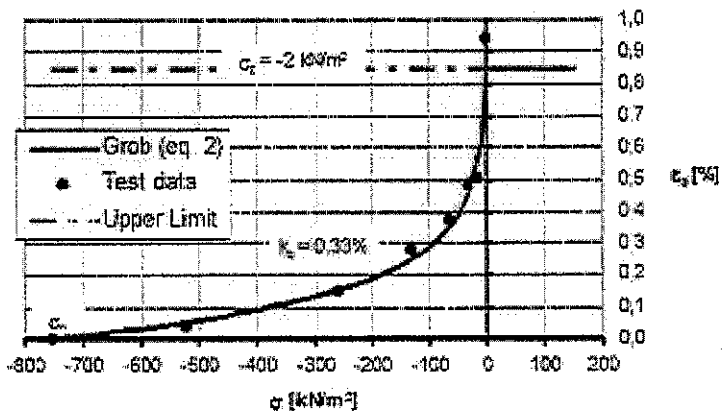
Modelo constitutivo (t = ∞)

summarizes the swelling characteristics of the soil

measure for magnitude of decompression

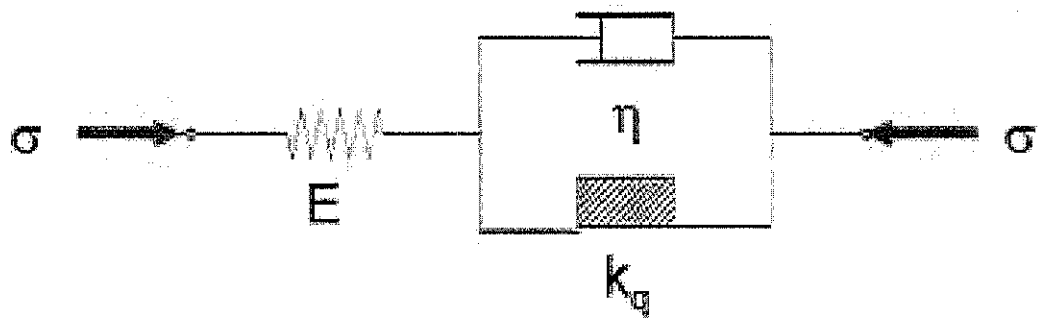
$$ {}^{q}\varepsilon_{i\infty} = -k_q \begin{cases} 0 & , \sigma_i \le \sigma_{i0} \\ \log(\sigma_i / \sigma_{i0}) & , \sigma_{i0} < \sigma_i < \sigma_c \\ \log(\sigma_c / \sigma_{i0}) & , \sigma_i \ge \sigma_c \end{cases} $$

$i = 1..3$



Modelo reologico equivalente

Acoplamiento en paralelo de un elemento "expansivo" (Kq) y un amortiguador (η) (además del muelle elástico)



MODELO DE WITTKE

- Cálculo elástico incluyendo la cavidad y obtención de las tensiones principales
- Deducción de las deformaciones de hinchamiento y los incrementos de tensión asociados (Ley triaxial)
- Se introduce el factor de tiempo η_q y se calcula el intervalo de tiempo mínimo para conseguir el equilibrio en todos los elementos
- Se van incrementando (< 10%) las tensiones de hinchamiento hasta los valores finales, equilibrando el sistema en cada escalón.

MODELO DE HINCHAMIENTO (Wittke)

A) Ley tensión-hinchamiento de tipo triaxial

B) Hipótesis de una ley reológica de tiempo-cambio de volumen

$\Delta V = K - m \log p$ (Huder-Amberg)

o

$$\varepsilon^q_{z\infty} = K_q \cdot \log\left(\frac{\sigma_z}{\sigma_0}\right)$$

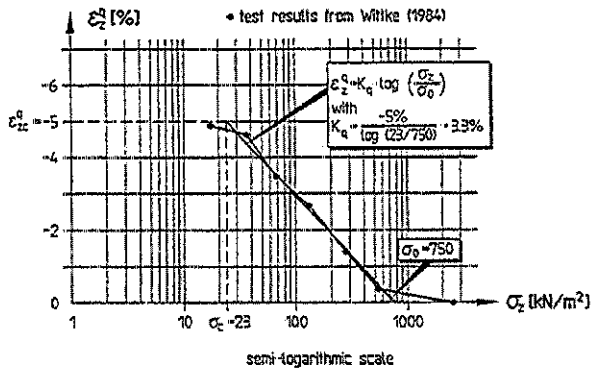
C) Cálculo de las deformaciones con el tiempo

$$\frac{\partial \varepsilon^q_i(t)}{\partial t} = \frac{1}{\eta_q} \cdot \left[\varepsilon^q_{i\infty} - \varepsilon^q_i(t)\right]$$

η_q = parámetro de hinchamiento-tiempo

$$\frac{1}{\eta_q} = a_0 + a_{el}\,\varepsilon^{el}_v + a_{vp}\,\min\left\{\varepsilon^{pl}_v, \max EVP\right\}$$

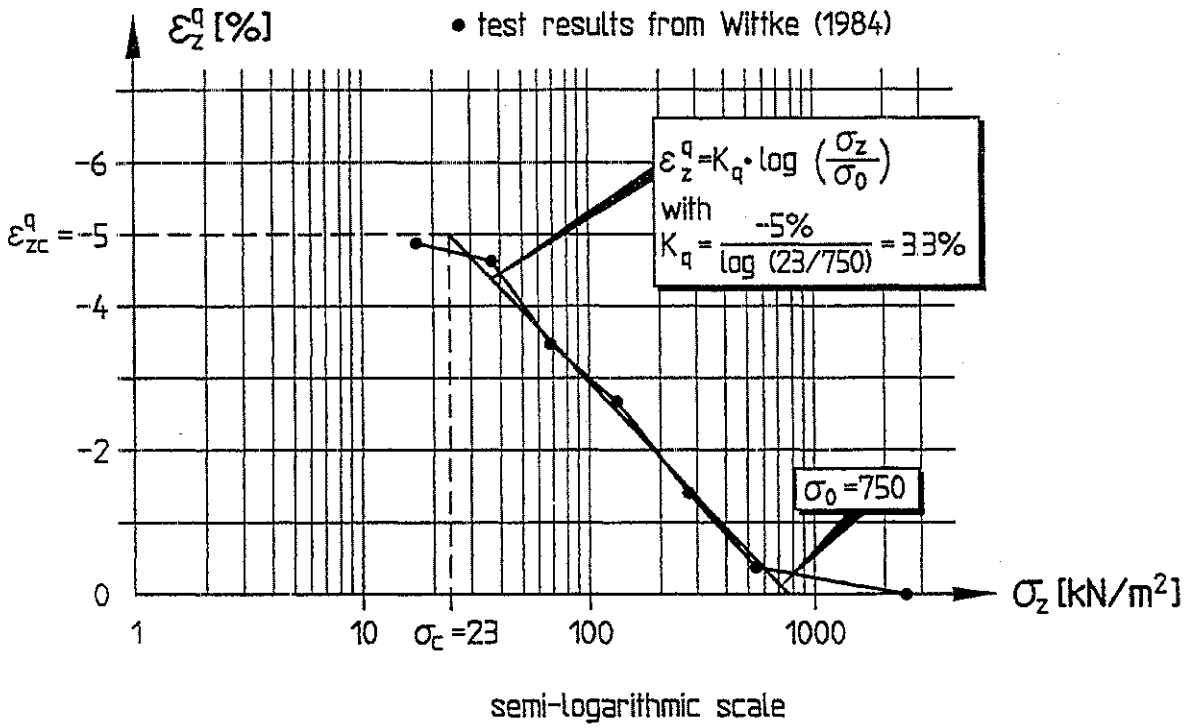
EVP = límite superior de la deformación plástica



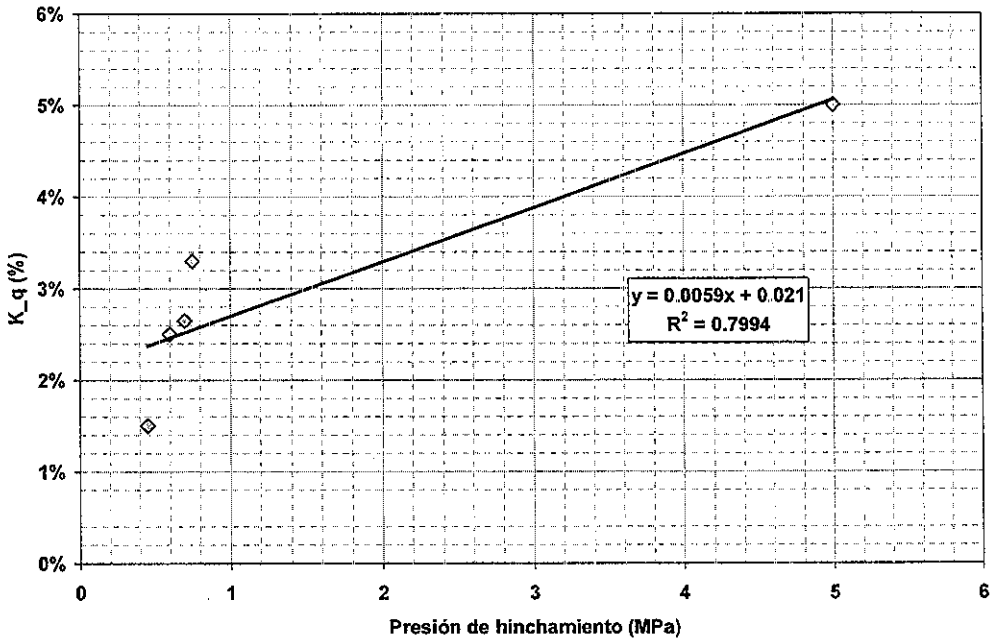
Límite inferior: el hinchamiento libre

Límite superior: la presión de hinchamiento

DETERMINACION DE Kq

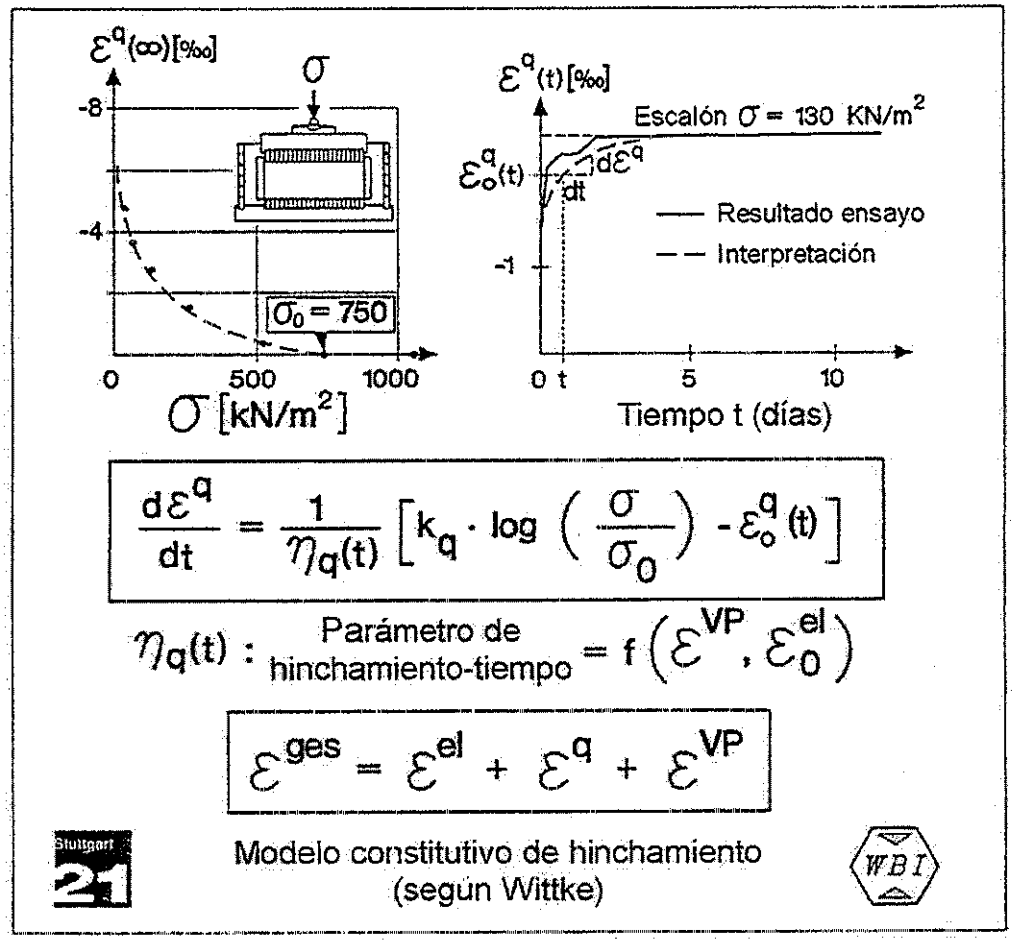


PENDIENTE Kq



RELACION ENTRE LA PRESION DE HINCHAMIENTO Y LA PENDIENTE Kq

Presión hinchamiento (MPa)	*Pendiente K_q*	*Litología*	*Fuente*
0.45	1.5%	Limolita	Wittke 2000
0.70	2.7%	Margas yesíferas (Túnel de Martorell)	Serón, Garrido y Romana
0.75	3.3%	Limolita con anhidrita	Wittke 2000
5.00	5.0%	Anhidritas (Túnel de Fabares y Túnel de Lilla)	Proyecto GAMMA GEOTECNICA
0.60	2.5%	Margas yesíferas (Túnel del Perdón)	Proyecto INGEOTEC



MODELO DE HINCHAMIENTO

A) LEY TRIAXIAL TENSIÓN-HINCHAMIENTO

$$\begin{Bmatrix} \Delta\sigma_1 = (\lambda + 2G)\varepsilon_{1\infty}^q + \lambda\varepsilon_{2\infty}^q + \lambda\varepsilon_{3\infty}^q \\ \Delta\sigma_2 = \lambda\varepsilon_{1\infty}^q + (\lambda + 2G)\varepsilon_{2\infty}^q + \lambda\varepsilon_{3\infty}^q \\ \Delta\sigma_3 = \lambda\varepsilon_{1\infty}^q + \lambda\varepsilon_{2\infty}^q + (\lambda + 2G)\varepsilon_{3\infty}^q \end{Bmatrix}$$

B) LEY INCREMENTAL DE LAS TENSIONES

$$\sigma_i\,(t + \Delta t) = \sigma_i\,(t) + \Delta t^{min}\,\Delta\sigma_i\,/\;\eta_q$$

Metodología

- Hay que detectar el riesgo de expansividad y proyectar adecuadamente el sistema constructivo y el sostenimiento-revestimiento

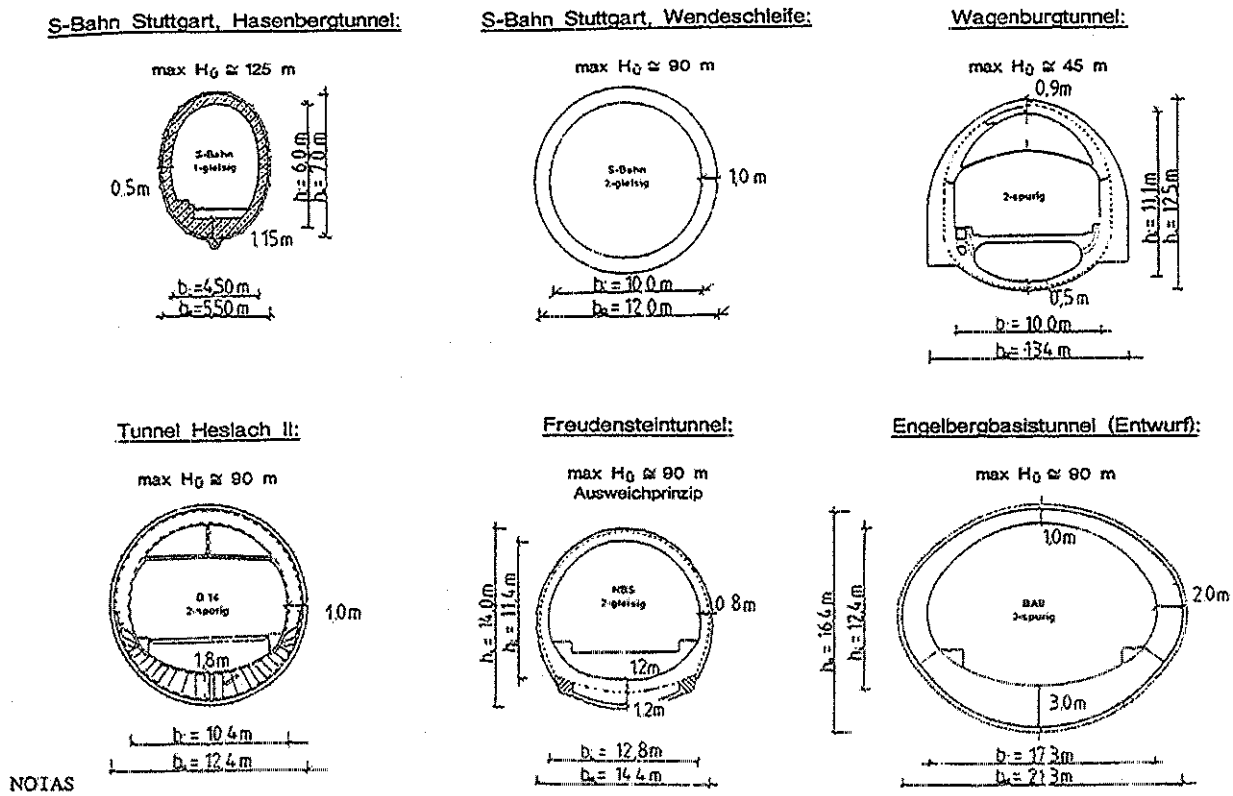
- Partiendo de modelos 3D (ampliación de la ley de Grob- el modelo de Wittke, etc.), propuesta de una *formulación implicita de tipo viscoso*
  → se introduce así el tiempo

- Dos parámetros fundamentales:
  → k_q representa el potencial de hinchamiento
  → η modula la evolución del proceso con el tiempo
- Calibrar el modelo de acuerdo con los resultados de ensayo (a pesar de su dispersión)

- Intentar medir deplazamientos y presiones in situ

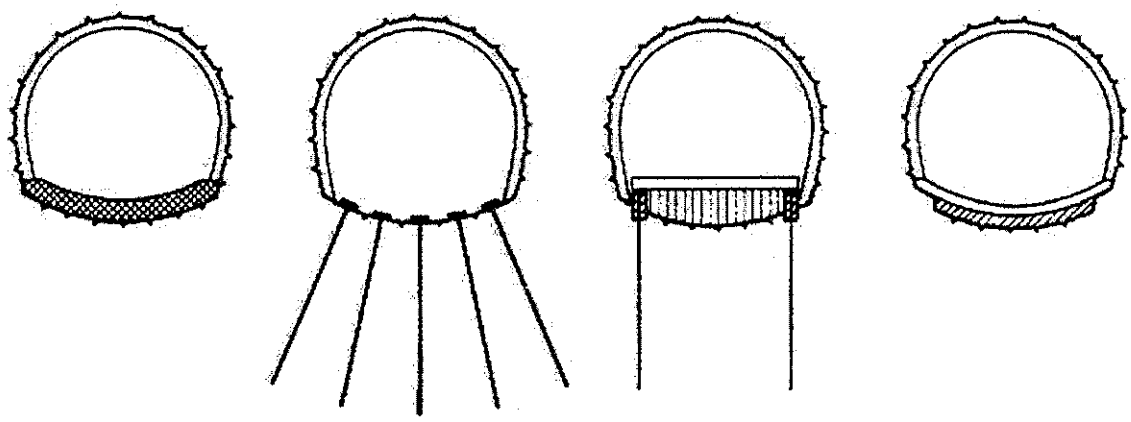
LA EXPANSIVIDAD EN TUNELES REALIZADOS POR TUNELADORA

- **La expansividad no afecta a los escudos (dudas cuando se adiciona mucha agua y espumas)**
- **El riesgo se produce cuando la tuneladora se detiene un tiempo que permite el desarrollo de los hinchamientos. En ese caso:**
  - **Rellenar con espuma de poliuretano en torno al escudo**
  - **Rigidizar el escudo**
  - **Excavar una caverna en torno al escudo**



NOTAS
- Todos los túneles van en anhidrita, salvo el de Heslach II donde la anhidrita solo llegaba al nivel de contrabóveda
- H_0 = Cobertera máxima

Secciones típicas utilizadas en Alemania

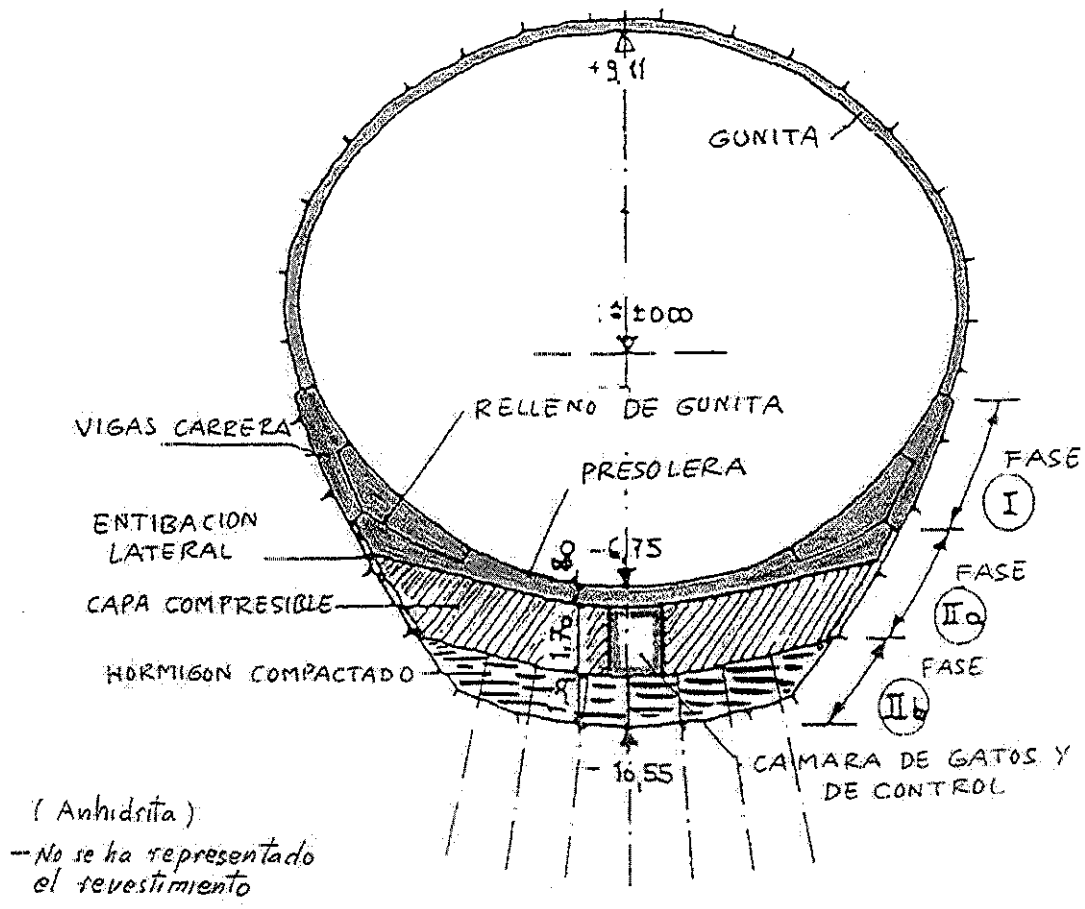


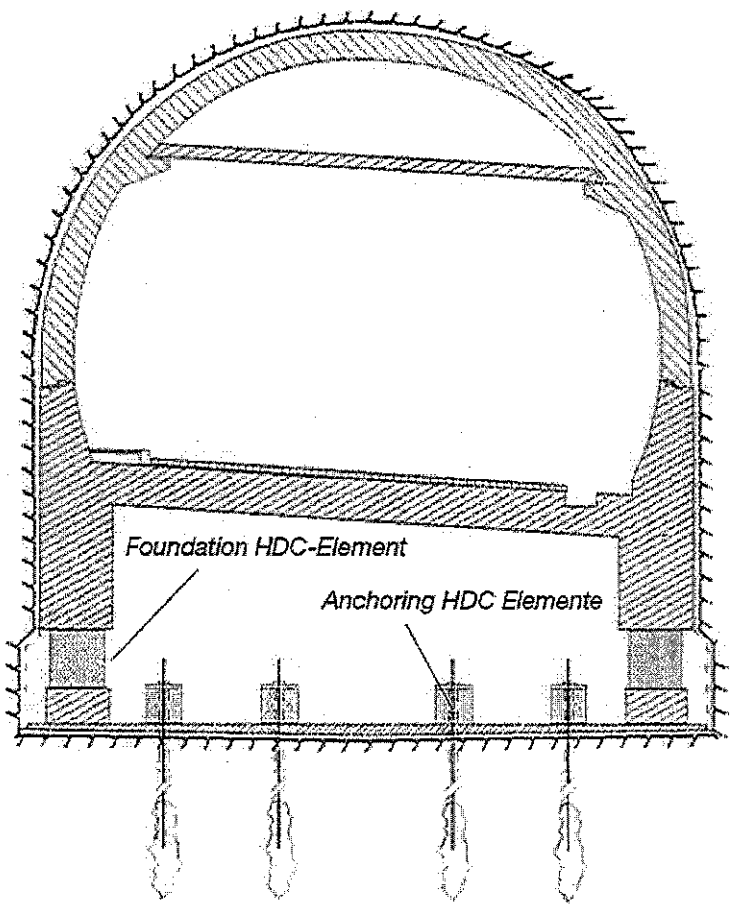
INVERT ARCH | ANCHORING SYSTEM | OPEN SPACE | YIELDING SUPPORT

CONTRABÓVEDAS EN TERRENO EXPANSIVO

(Kovari et al., 1988)

ENGELBERG TUNNEL





El revestimiento modular ajustable de Kovári

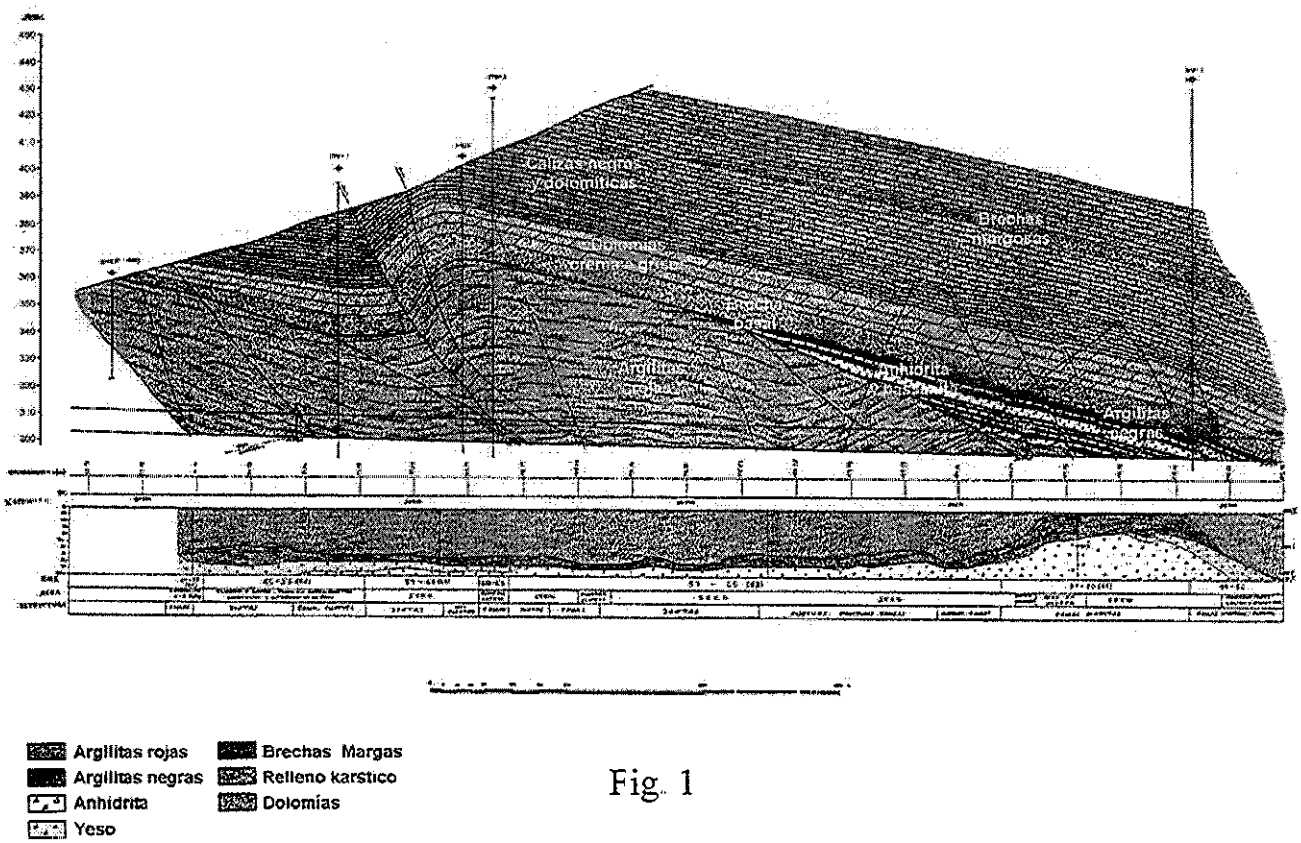
Túnel de Chienberg

TÚNELES DE FABARES

Autovía del Cantábrico

Tramo: Lieres – Villaviciosa (Asturias)

AUTOVÍA DEL CANTÁBRICO (AS-113). TÚNEL DE FABARES
PERFIL LONGITUDINAL DEL TUBO IZQUIERDO (PK 2+080 – 2+520)



Argilitas rojas
Argilitas negras
Anhidrita
Yeso
Brechas Margas
Relleno karstico
Dolomías

Fig. 1

TUNEL	Presión de hinchamiento Kp/cm^2
Hauenstein	14-25
Belchen	7-44
Wagenburg	10-50
Heslach	7-33
Freudenstein	1-24

Fig. 2

MATERIAL	E (inalterado)	E (rebland. por exp.)
Anhidrita	8000-15000 Mpa	3000-10000 Mpa
Anhidrita+argilita	3000-5000 Mpa	800-1500 Mpa
Argilita	1000-2500 Mpa	200-500 Mpa
Argilita+yeso	1500-4000 Mpa	300-800 Mpa

Fig. 3

ENSAYOS DE HINCHAMIENTO LIBRE

Anhidrita	**8% en 1443 días**
Arcilla roja con vetas de anhidrita	**>15% en 1413 días**
Argilita negra y anhidrita	**>11% en 1562 días**
Anhidrita remoldeada	**>30% en 1420 días**
Arcilla roja con vetas de anhidrita, remoldeada	**>65% en 1420 días**

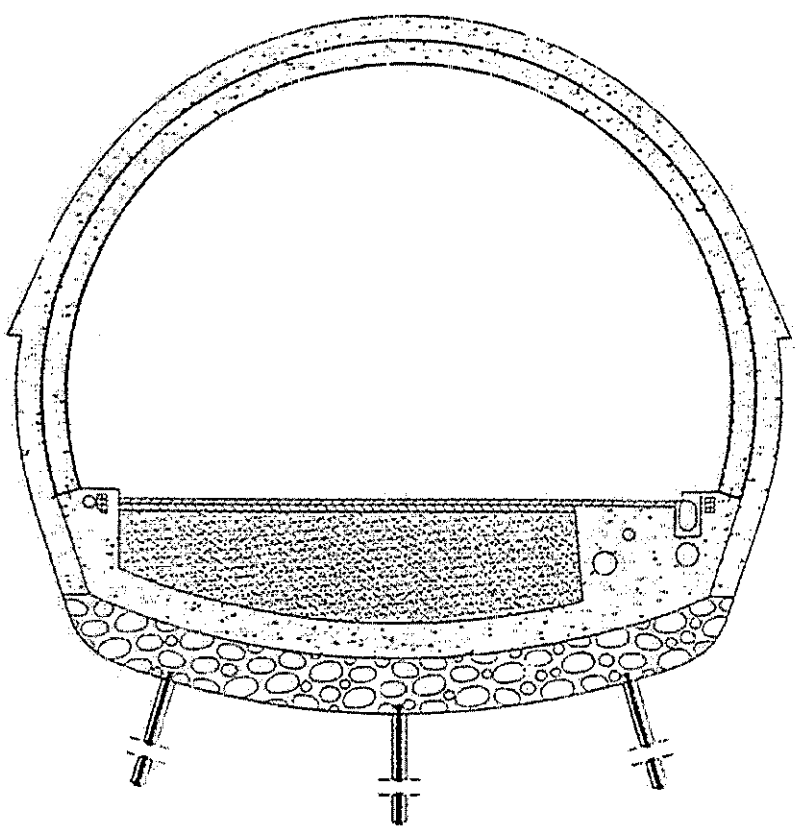
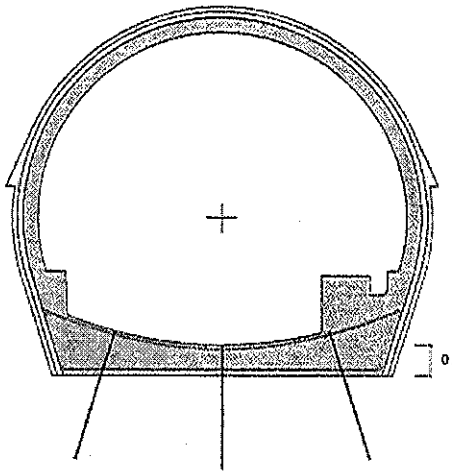
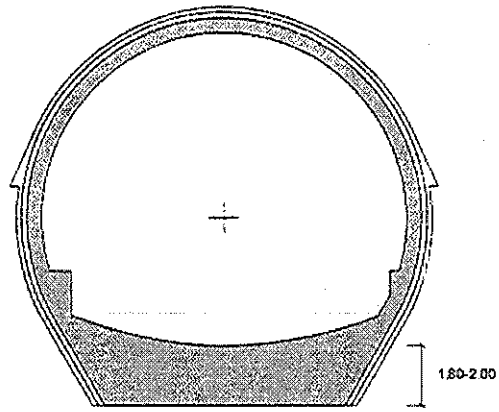


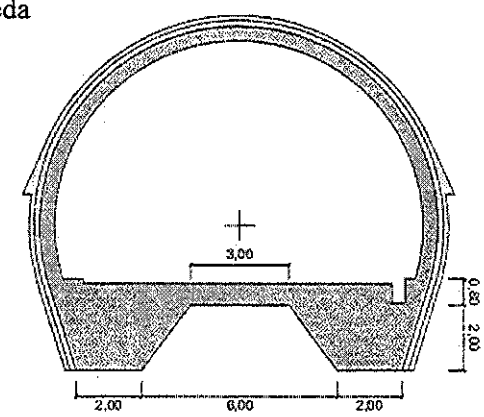
Fig. 2.- Solución de Proyecto



Solución con contrabóveda armada y anclada



Solución con solera gruesa



Solución con cámara de expansión

Fig. 4

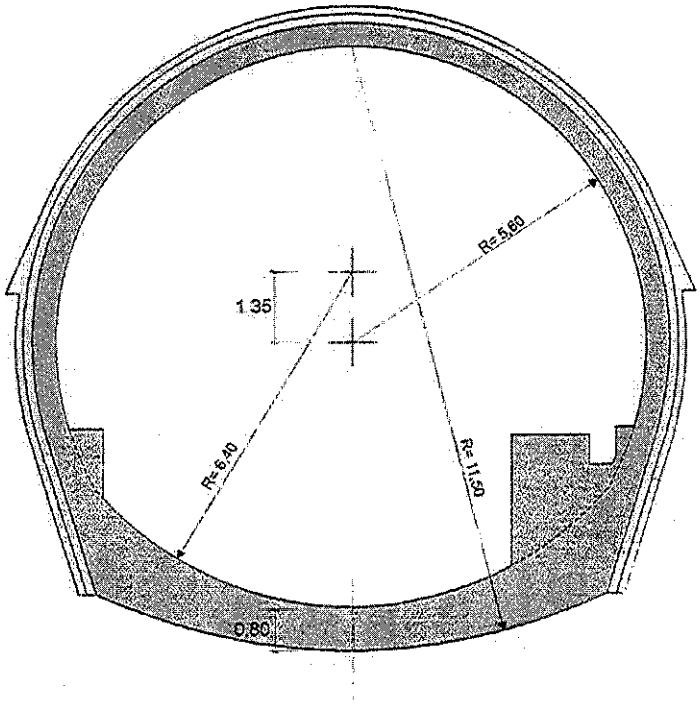


Fig. 5.- Contrabóveda de baja curvatura

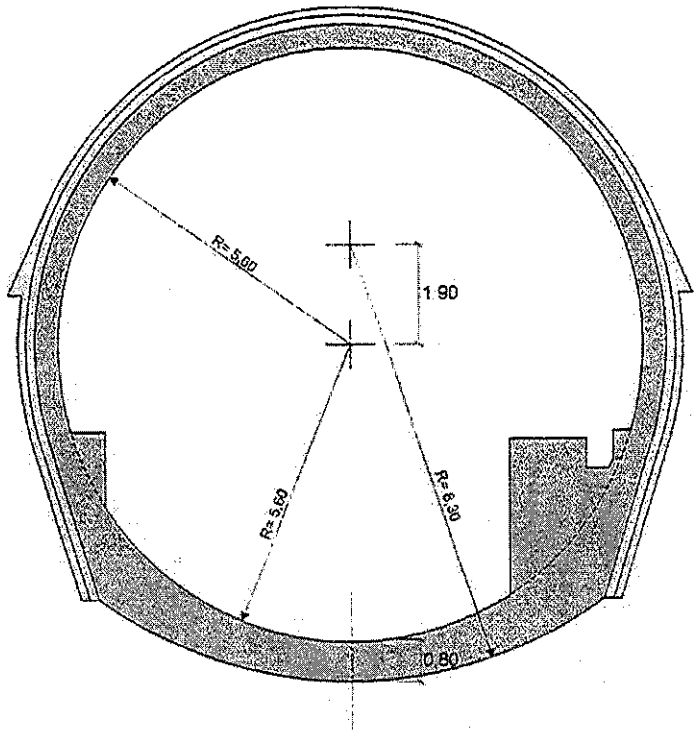


Fig. 6.- Contrabóveda de alta curvatura y e=0,80m

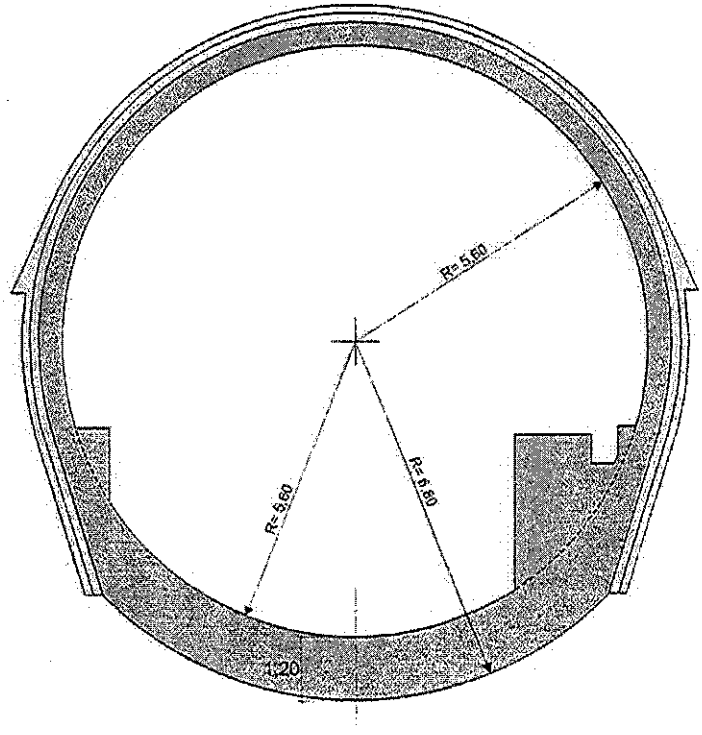
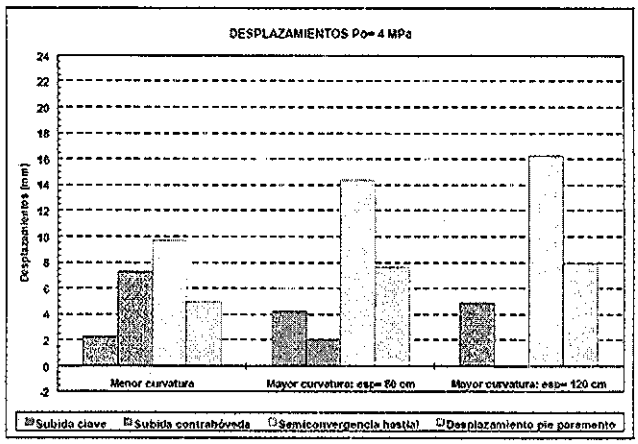
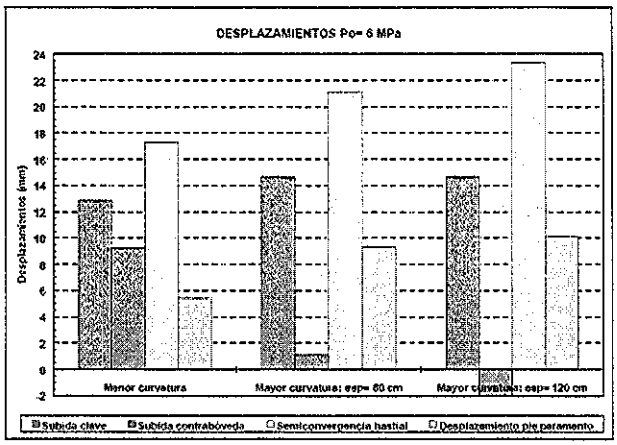


Fig. 6.- Contrabóveda de alta curvatura y e=1,20m

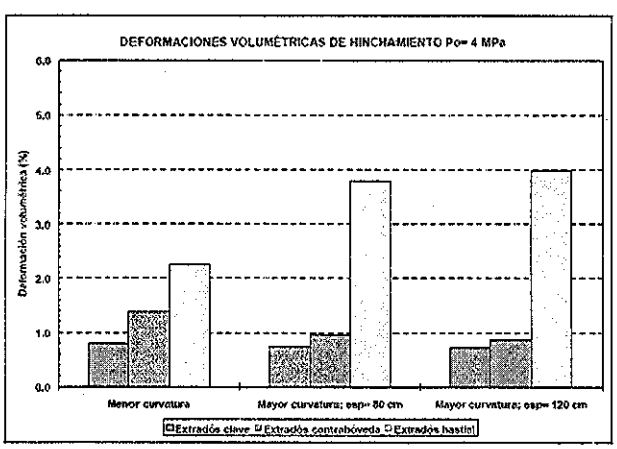


a) t=200 años para σ_0= 4Mpa

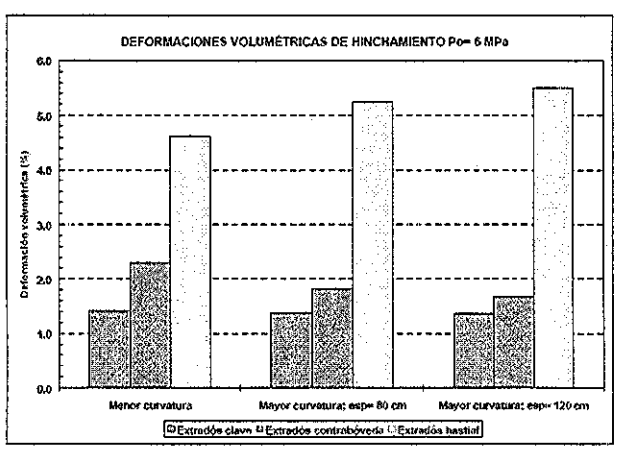


b) t=200 años para σ_0= 6Mpa

Fig. 8.- Comparación de desplazamientos calculados en revestimientos



a) t=200 años para σ_0= 4Mpa



b) t=200 años para σ_0= 6Mpa

Fig. 9.- Comparación de deformaciones volumétricas de hinchamiento

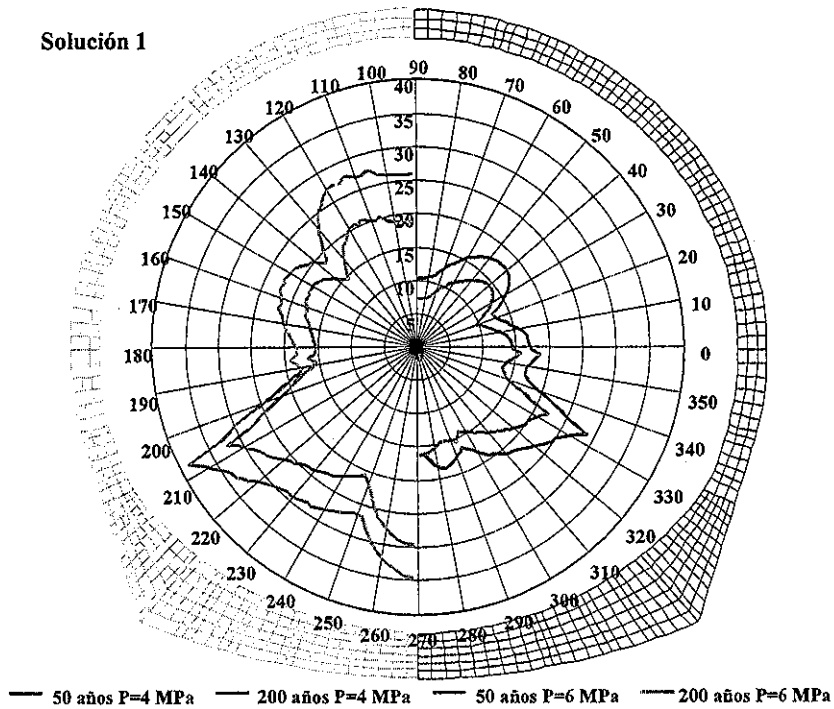


Fig. 10.- Evolución de compresión máxima (en MPa) en anillo para contrabóveda de menor curvatura

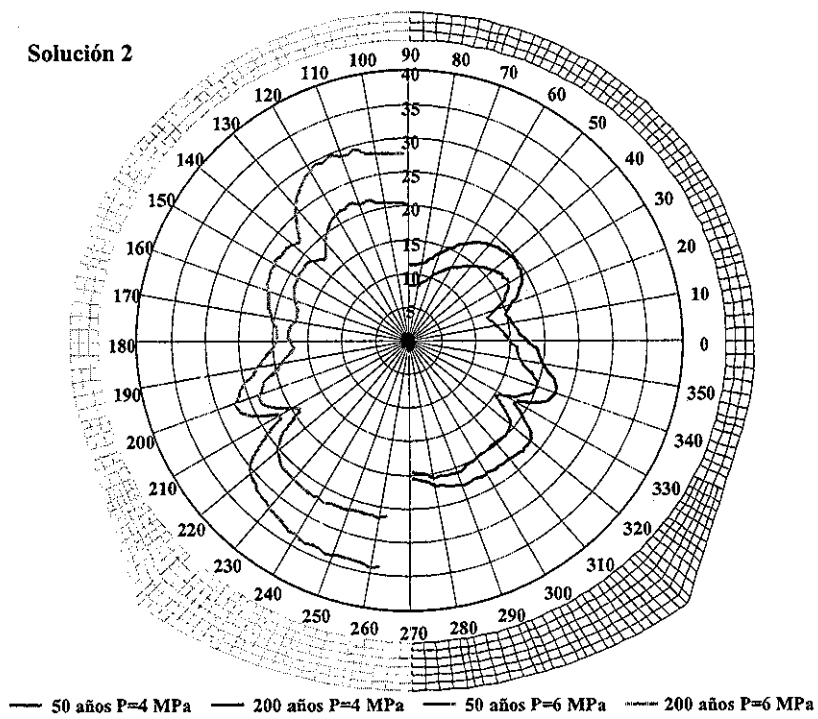


Fig. 11.- Evolución de compresión máxima (en MPa) en anillo para contrabóveda de mayor curvatura de 80 cm

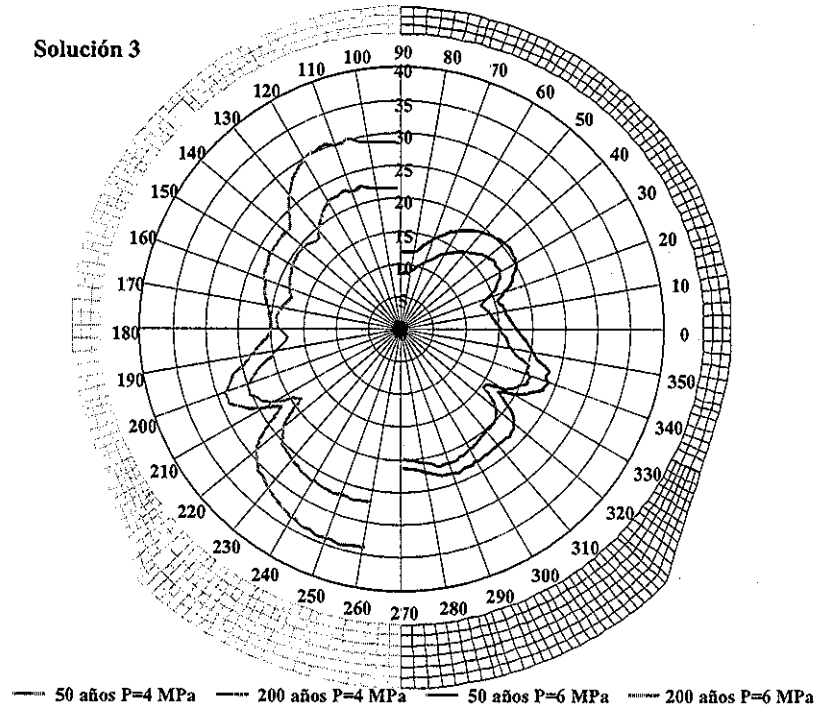


Fig. 12.- Evolución de compresión máxima (en MPa) en anillo para contrabóveda de mayor curvatura de 120 cm

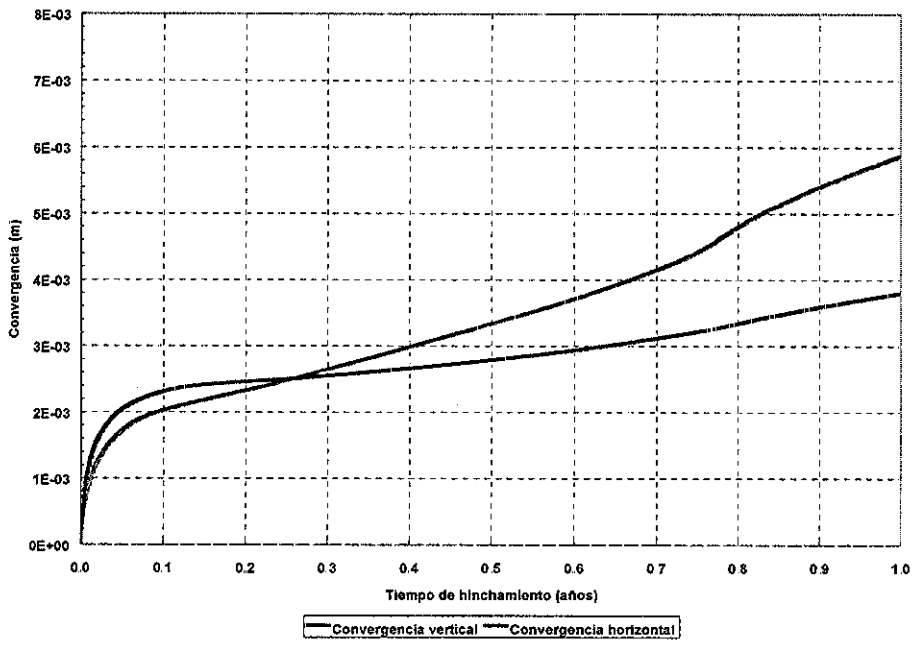
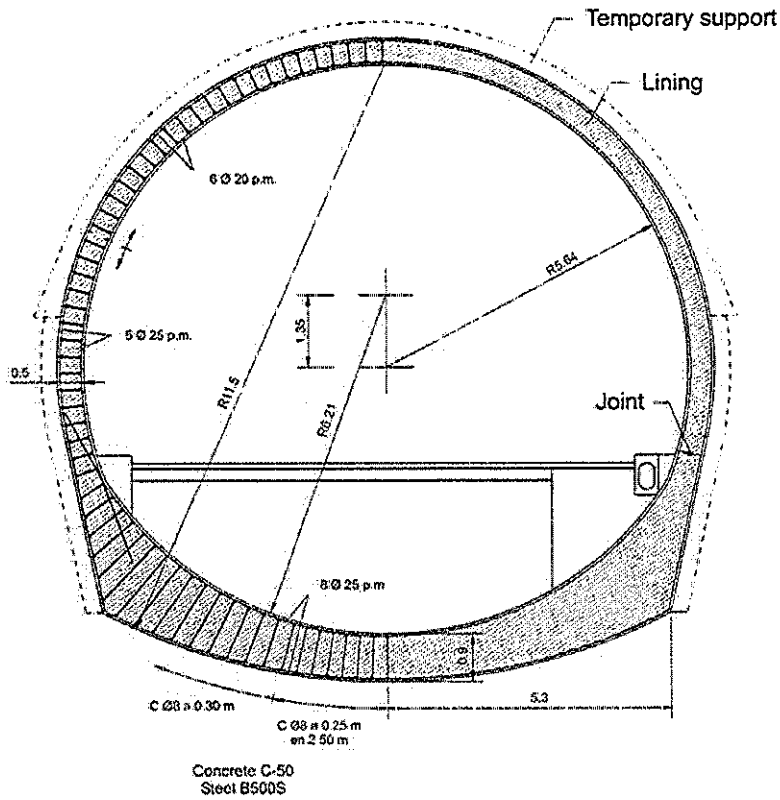


Fig. 13.- Evolución de las convergencias horizontal y vertical durante un período de 1 año tras la fase avance



SOLUCION CONSTRUIDA