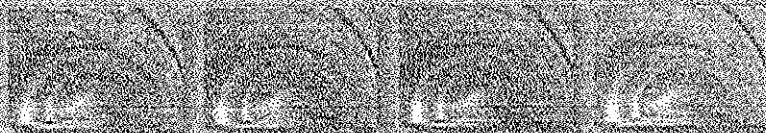


Máster Universitario en Túneles y Obras Subterráneas



ÁREA: A
MÓDULO: MECÁNICA DE SUELOS

**HINCHAMIENTO
RESISTENCIA AL CORTE**

HINCHAMIENTO RESISTENCIA AL CORTE
(incluye texto, figuras y bibliografía)

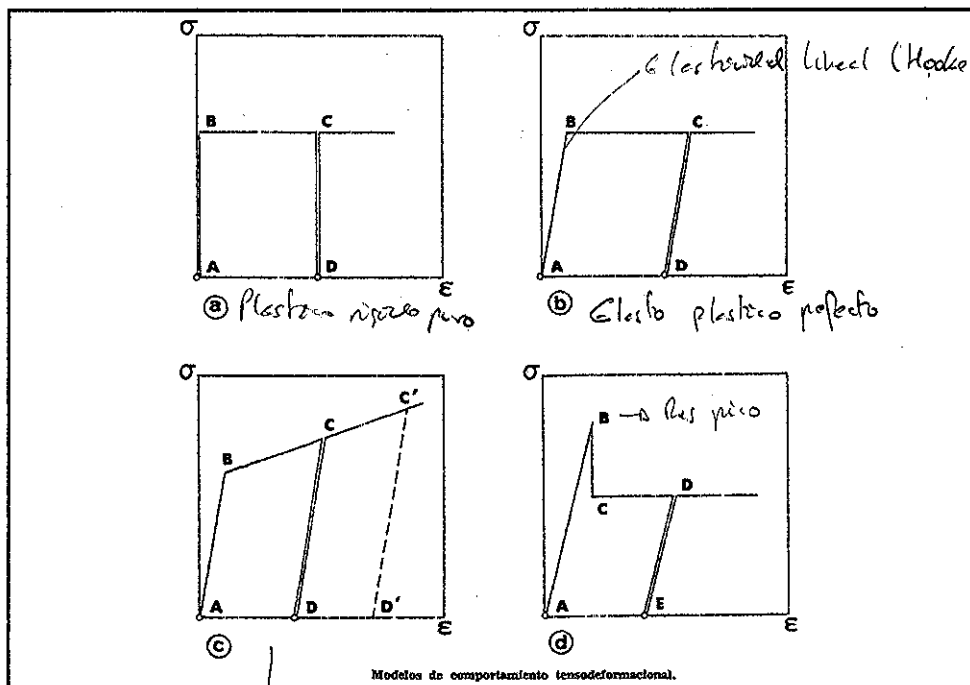
Ponente: L. Del Cañizo
Día: 06/02/07
Hora: 16:00 a 18:00

ESFUERZOS CORTANTES

Elasto Plástico Perfecto

Plástico Rigidizable

Plástico Frágil Reblandecible

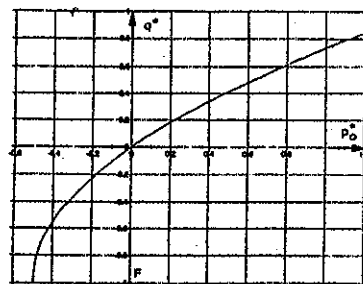


Sólido rigidizable
(Ejemplo: acero)

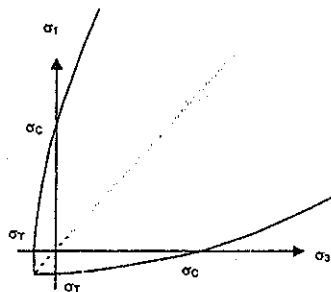
Reblandecible.

Modelos de comportamiento tensodeformacional

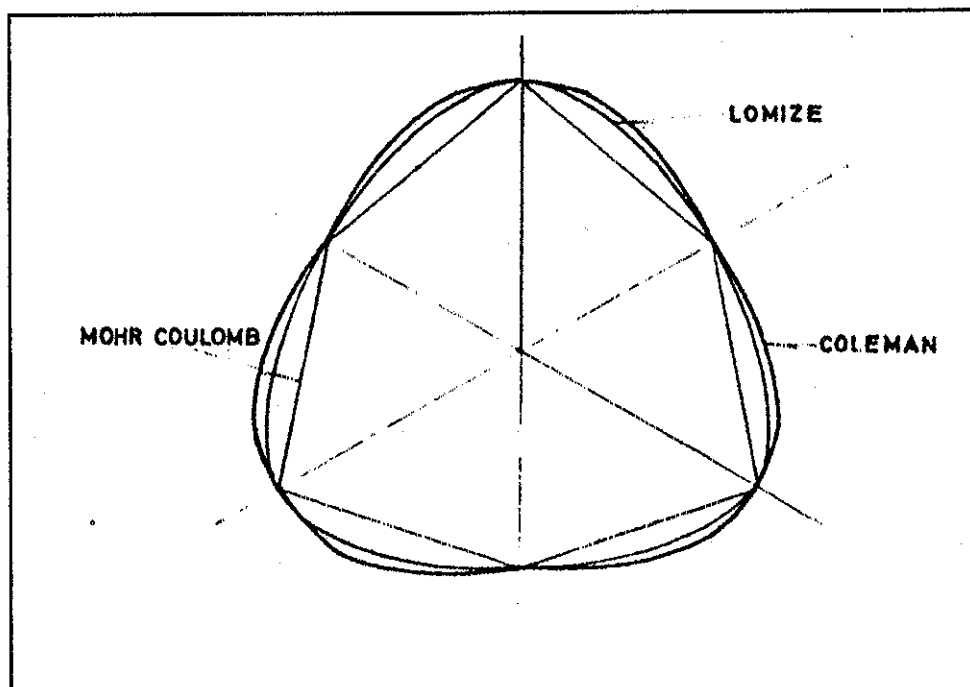
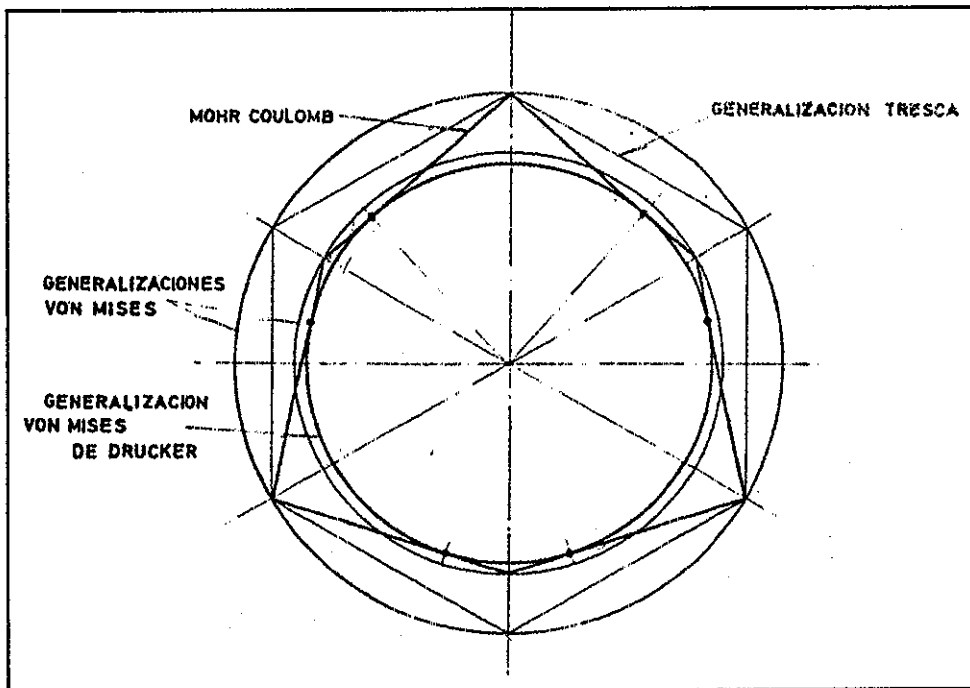
Rotura a Cortante
 Mohr Coulomb
 Hoek y Brown
 Tresca
 Von Mises
 Cortante Puro
 τ_{xy} equivale $\sigma_x \sigma_y$

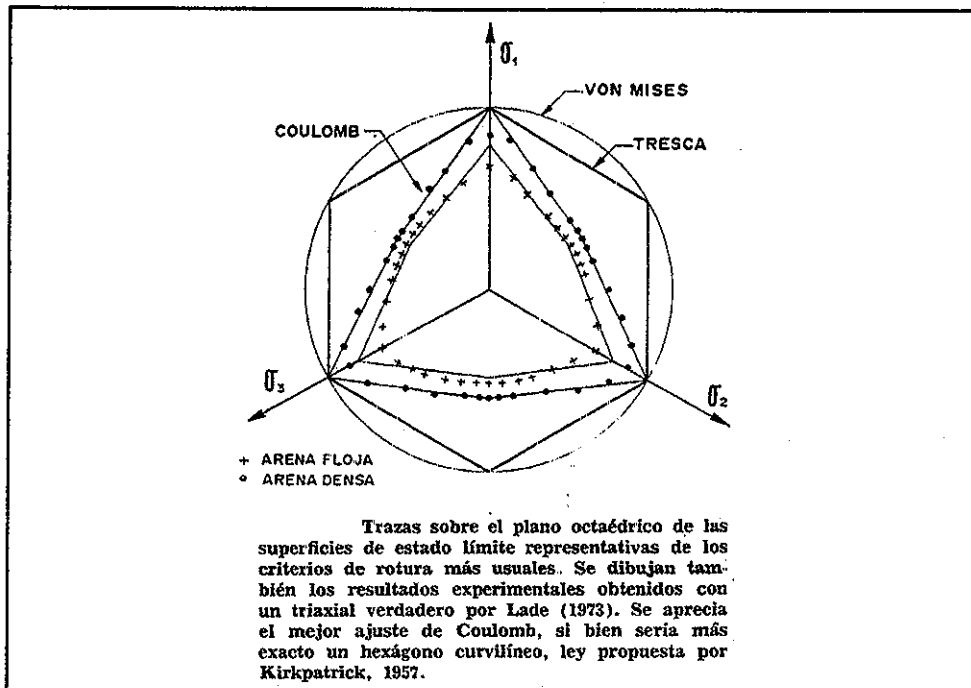


Criterio de rotura de Hoek y Brown (1980) en parámetros de Lambe



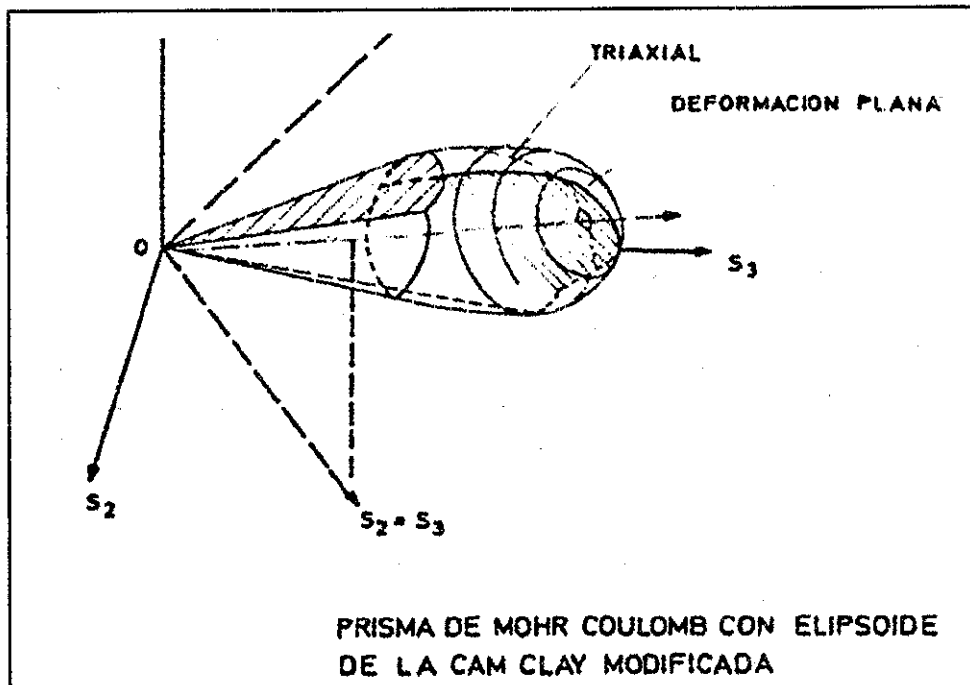
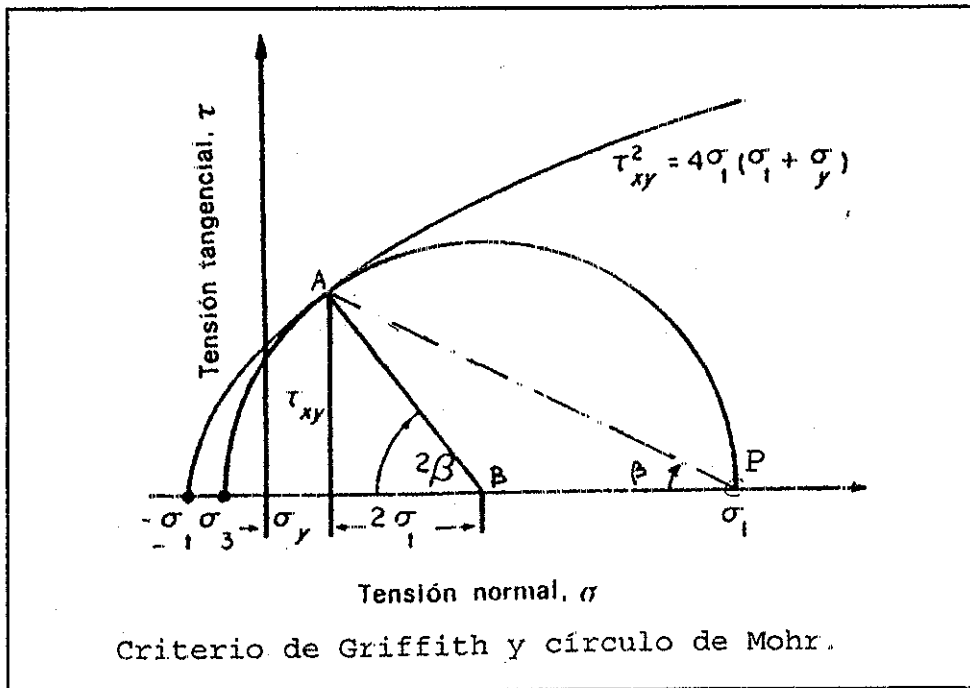
Criterio de Hoek y Brown en tensiones principales.





Rotura a TRACCIÓN
Griffith

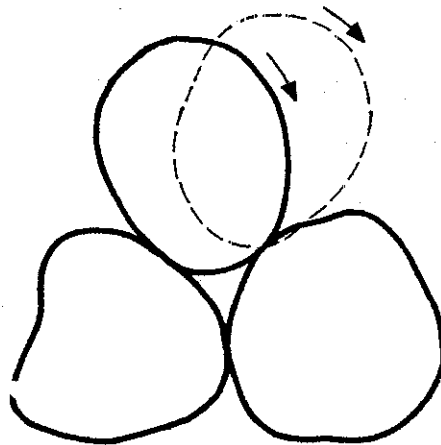
Rotura a COMPRESIÓN
Roscoe, Schoffield



Deformación =
distorsión y rotura partículas
movimiento entre partículas

Deformación volumétrica

Distorsión angular



Movimiento de los granos
de una arena densa al someterla a
esfuerzos cortantes.

Circulo Mohr Deformaciones

Ley de Normalidad

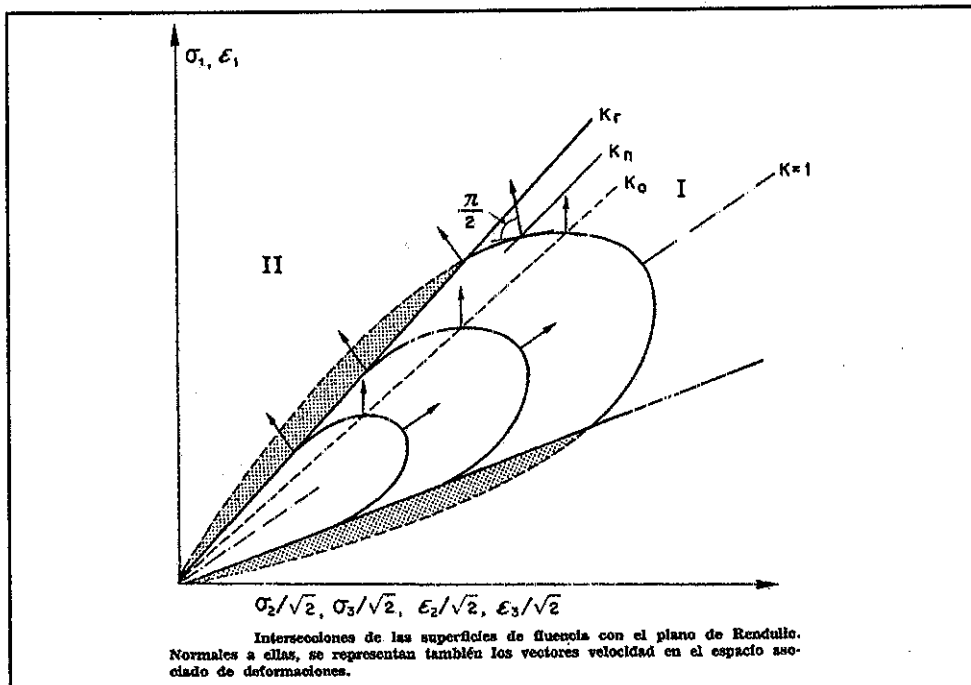
DILATANCIA

Real: $\text{sen } \nu < \text{sen } \phi$

sen ν

DILATANCIA POSITIVA

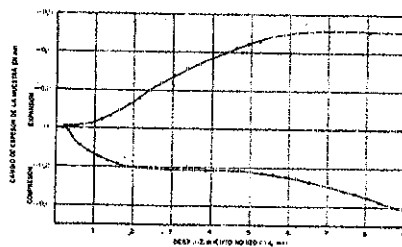
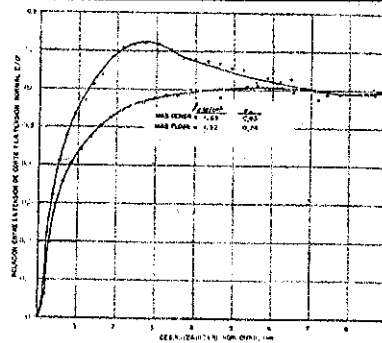
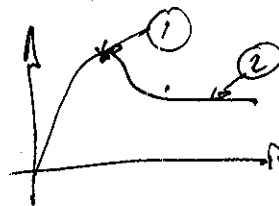
DILATANCIA NEGATIVA



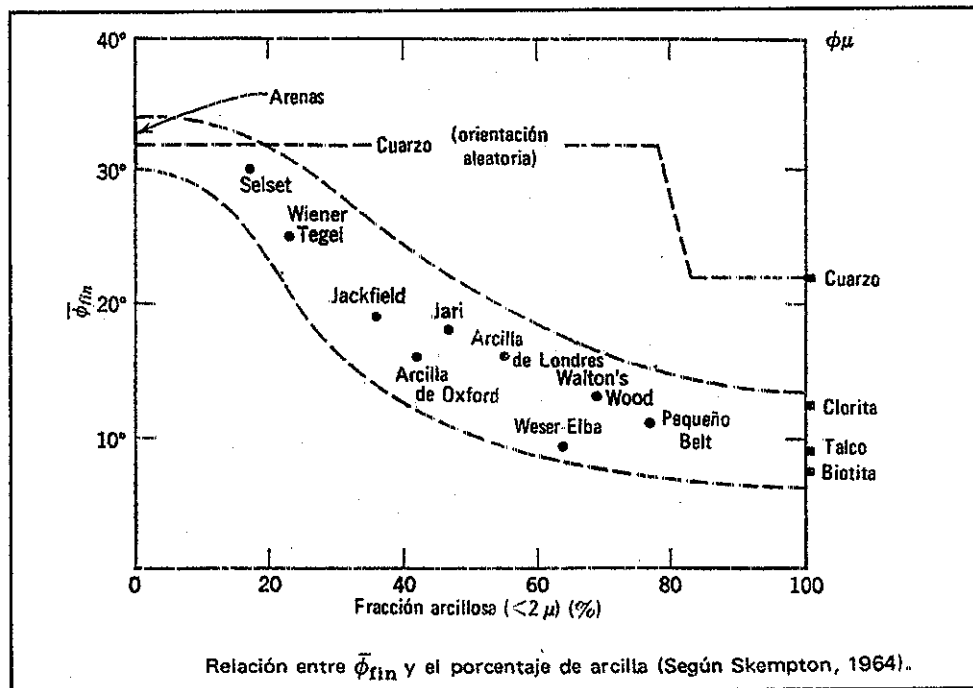
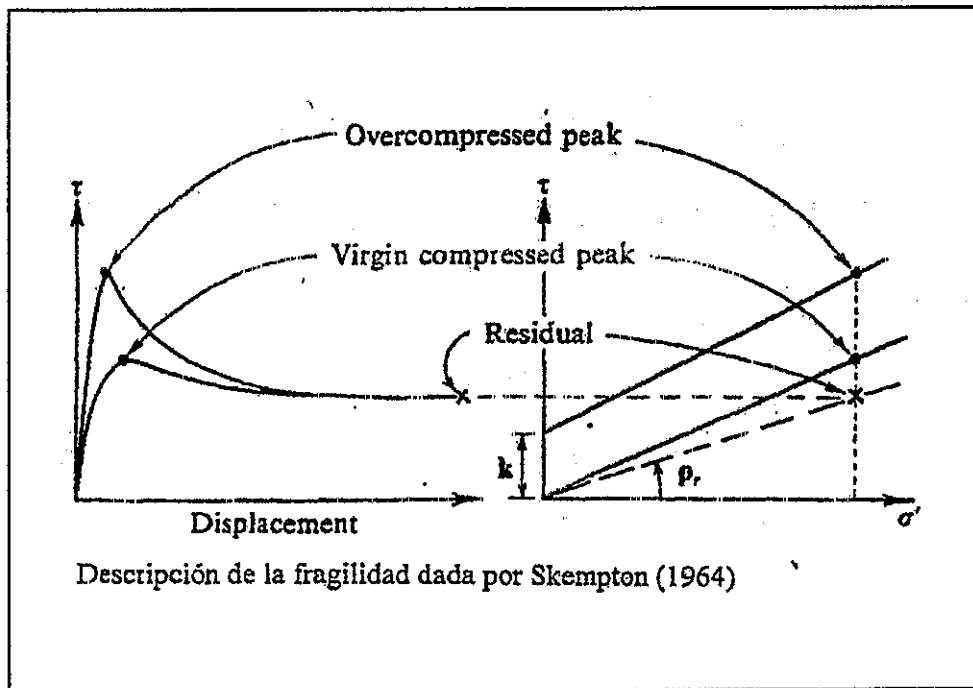
RESISTENCIA de PICO (1)

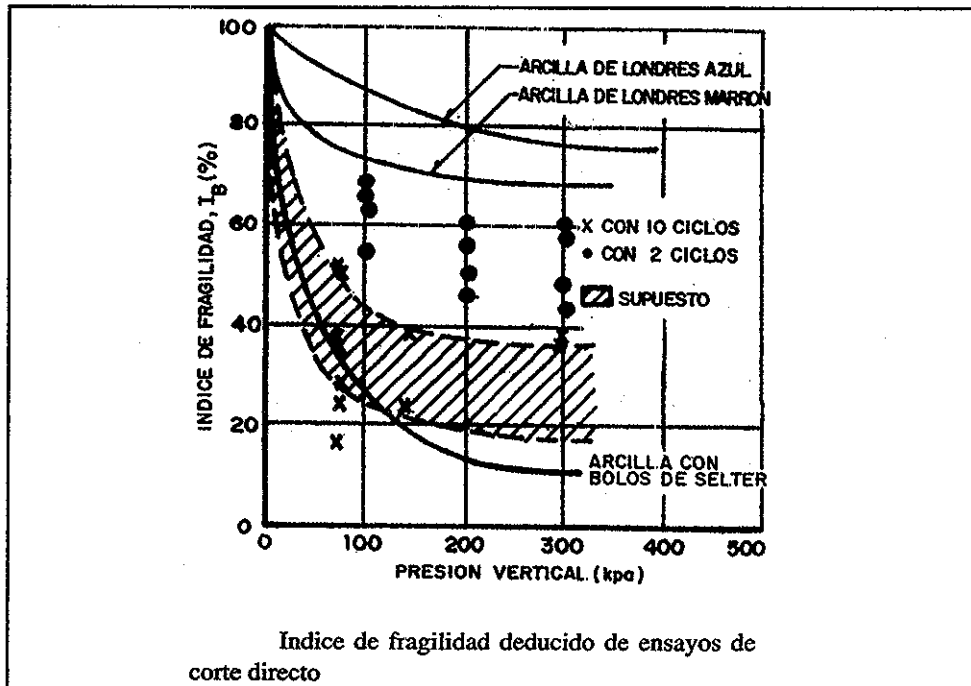
RESISTENCIA RESIDUAL (2)

RESISTENCIA CRÍTICA



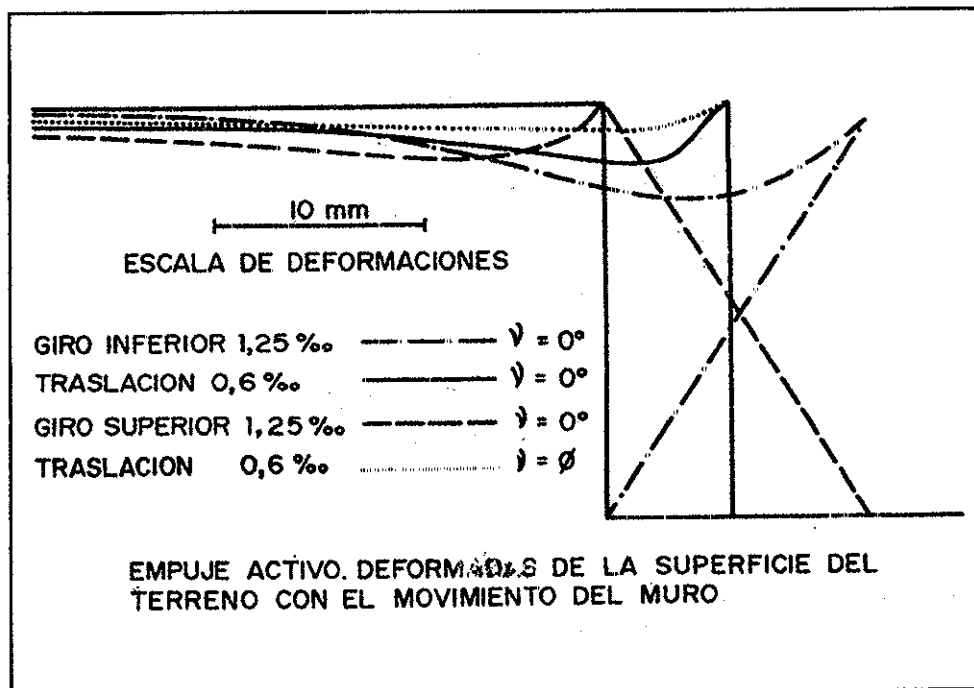
Ensayo de deformación controlada en arena suelta compactada entre
 16 y 18 p. 16, presión vertical: 2.25 kg/cm², densidad de la arena: 1.65 g/cm³.
 Espesor: 2.25 cm, velocidad de corte: 0.6 mm/min = 1.5 in/min.

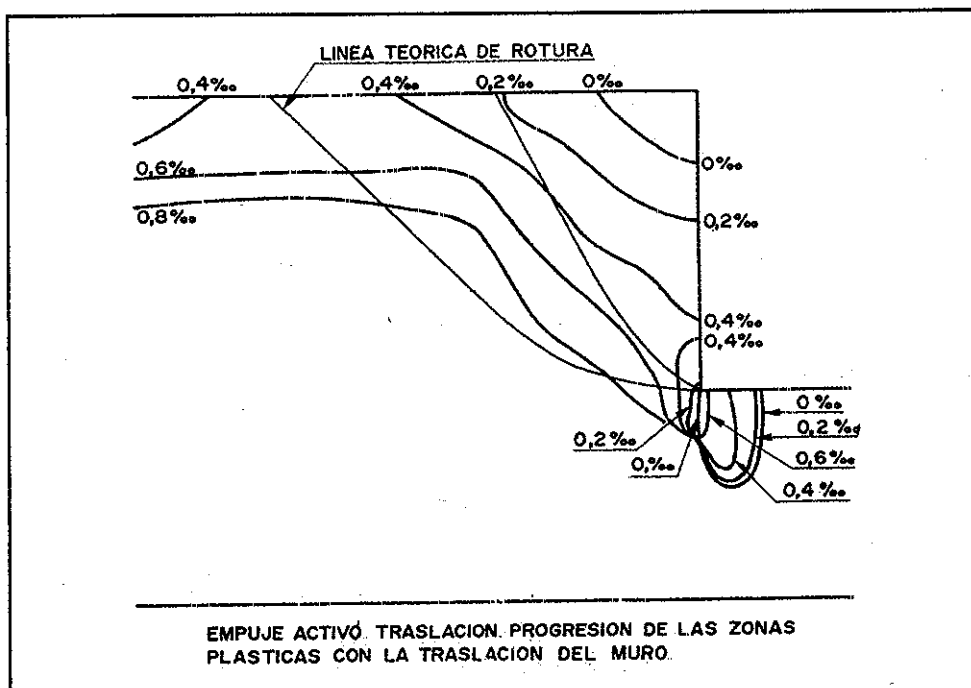
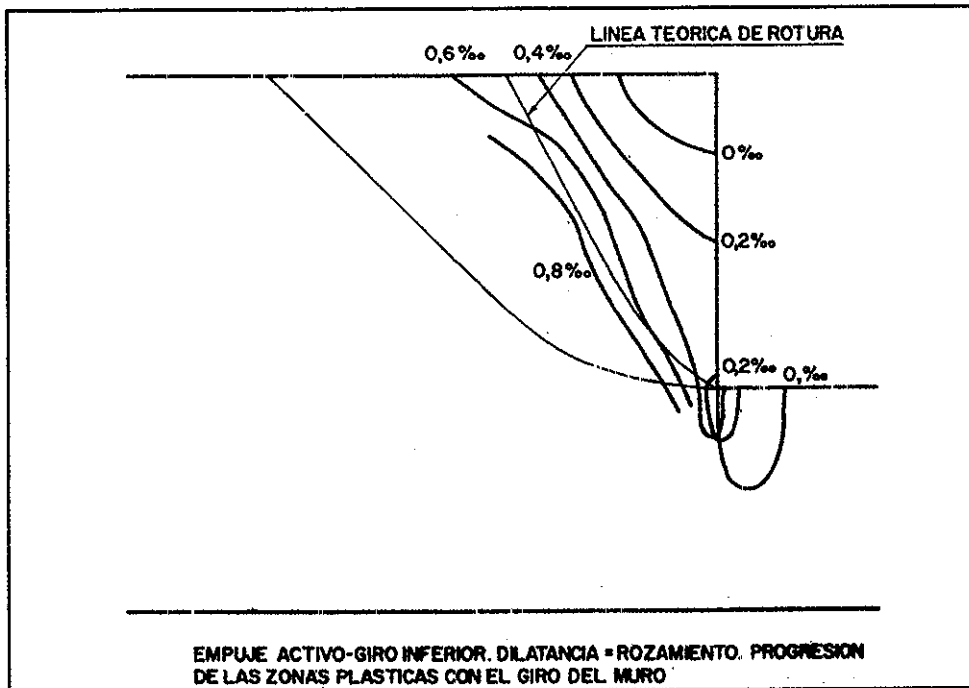


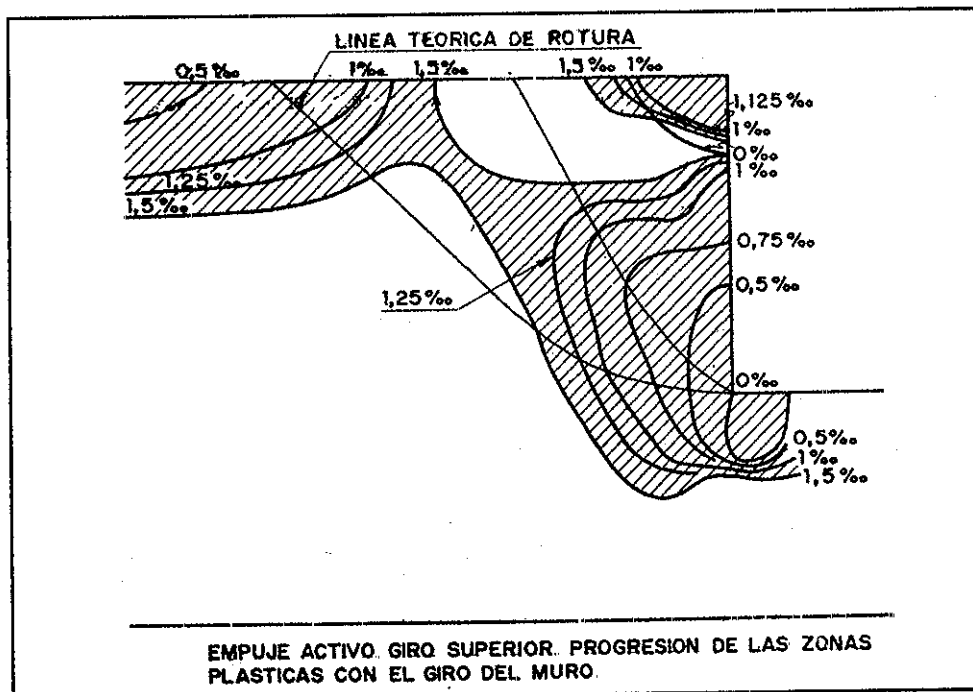
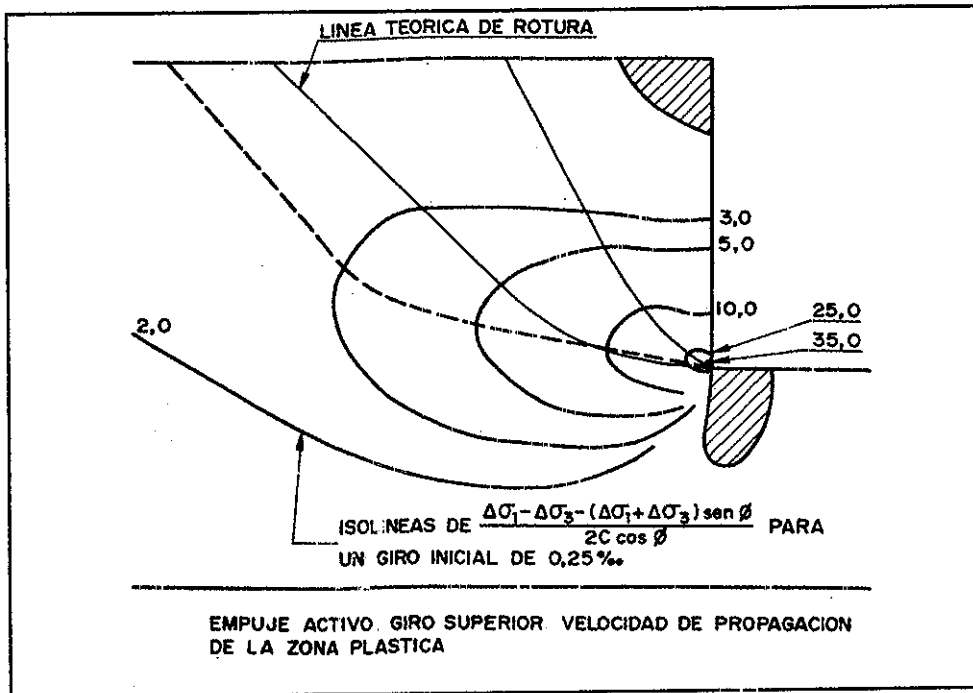


Trayectoria de Tensiones
 Φ c' ¿Valores a aplicar?
 Tipo de ensayo
 Tipo de problema
 Tipo de terreno
 preconsolidado o no
 con o sin Drenaje
 Residual arcilla < pico RSC=1
 arcilla laminar o no Falla
 Arcilla $c' = f(RSC > 1)$
 c' residual $\rightarrow 0$

TALUDES MUROS TÚNELES







Master Universitario en Túneles y Obras Subterráneas

UPM AETOS Colegio ICCP 2007

Área A. Introducción y Materias previas

Módulo de Mecánica de Suelos

HINCHAMIENTO

Luis del Cañizo Perate, UPM, Esteyco

7-2-2007

1- INTRODUCCIÓN

Linder propuso una clasificación de los terrenos con hinchamiento (Fig. 1), que Jiménez Salas amplía y matiza (Fig. 2, ref. 7). Realmente el problema del hinchamiento y expansividad es muy general, es omnipresente en los diferentes tipos de obras, pero el artículo español incorpora más aspectos relacionados con los túneles.

Las causas son muy variadas, principalmente por cambios de humedad, facilitados por un proceso de descarga o por transformaciones químicas.

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>

Fig 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 piritita 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.

2- ARCILLAS EXPANSIVAS

El aumento de humedad de un suelo parcialmente saturado puede producir un **hinchamiento** del mismo, siendo mayor su magnitud cuando la plasticidad del suelo es también mayor y cuando su grado de saturación inicial es menor. El caso mas típico es el de las **arcillas expansivas**. (ref. 6). Todas las arcillas tienen cierto grado de expansividad, pero en general se suele reservar ese apelativo para aquellas que son expansivas en grado marginal, crítico o muy crítico. El mineral arcilloso más peligroso es la montmorillonita, especialmente la sódica, aunque otros muchos minerales son conflictivos, como la corrensite, que suele presentarse en el Keuper y asociada a yesos.

En las zonas áridas de España abundan bastante (arcillas de bujeo), lo que ha propiciado que los Geotécnicos españoles (del Laboratorio de Geotecnia del CEDEX principalmente) hayan investigado y realizado progresos en la lucha para solucionar los problemas que crean.

Los problemas que crean en edificaciones con cimentaciones superficiales o profundas, pavimentos, canales, muros, taludes, túneles, etc. pueden ser muy graves, difíciles y costosos de solucionar, e incluso han obligado a abandonar bastantes obras antes de terminarlas. Las profundas grietas en la arcilla que se generan lentamente durante cada época estival seca, facilitan la posterior entrada del agua provocando un hinchamiento brusco (ref. 6).

La capacidad de hinchar corresponde a un estado del suelo, a su bajo grado de saturación, y su efecto en una obra puede cambiar según ésta se realice en verano o en invierno (Fig. 3, ref. 6).

Las obras pueden resolverse si el terreno se encuentra al abrigo de cambios de humedad, como es el caso de situarse bajo el nivel freático, y si se cimenta a una profundidad superior a la de la *capa activa*, en que se produce dicha variación estacional de humedad. Un túnel suele situarse por debajo de la capa activa, pero la propia excavación puede provocar la variación de humedad.

2.1- Caracterización del terreno

La identificación de una arcilla como expansiva se puede realizar visualmente, por la aparición de grietas en el suelo, o incluso en los edificios de la zona y por la existencia de antecedentes en la zona.

Los ensayos de laboratorio de límites de Atterberg indican que la expansividad es crítica o muy crítica para valores de $LL > 60$, de $IP > 20$ y 35 , o para Límite Retracción < 10 . Hay indicio de expansividad cuando el % de partículas de $1\ \mu m$ es mayor a 20 y 28 , y cuando pasa el tamiz 200 más del 95% .

El Índice PVC (cambio potencial de volumen del ensayo de Lambe) es mayor de 4 . En un ensayo edométrico la Presión de Hinchamiento es mayor a $0,3\ MPa$, o bien el Hinchamiento libre es mayor al $10\ %$. Otro indicio es que la relación entre el coeficiente de consolidación y el coeficiente de entumecimiento sea $C_c / C_s < 4$.

Para predecir la magnitud del posible hinchamiento pueden realizarse ensayos edométricos en laboratorio, con una primera etapa con el suelo semisaturado con carga y descarga y luego procediendo a su inundación y volviendo a cargar. También existen ensayos mas sofisticados con succión controlada.

Existen modelos teóricos para calcular el hinchamiento, basados en la ecuación diferencial del Potencial capilar (Lyttton, Richards, Alonso, ref. 6 y 1). También existen fórmulas y correlaciones empíricas, como la de Jiménez Salas y Serratosa (ref. 6).

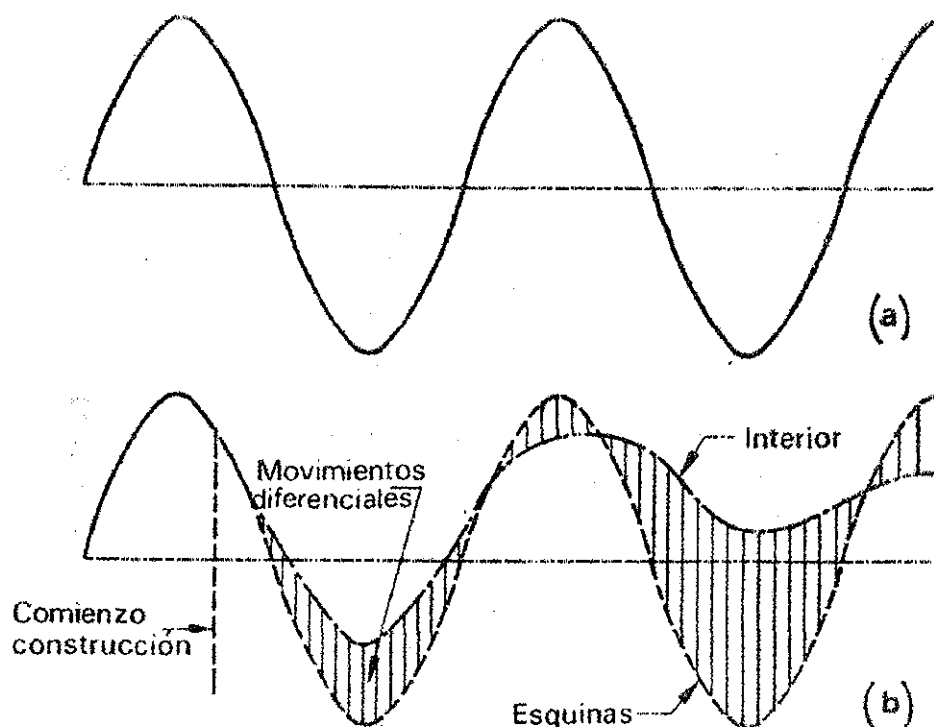
2.2- Problemas y soluciones

Las soluciones a los problemas de expansividad son muy variadas. Una posibilidad es aumentar la rigidez y resistencia de la estructura, a veces demasiado cara, pero que sin embargo puede ser necesaria de aplicar en túneles, como luego se indica.

Otra posibilidad es actuar justamente al contrario, dando flexibilidad a la estructura para que acepte las deformaciones sin romperse. Es el caso de diseñar un pavimento o una conducción de agua como muy flexibles, en lugar de rígidos.

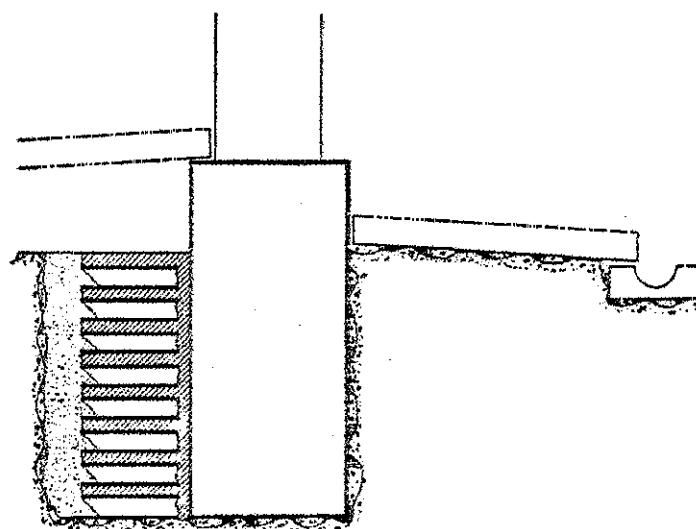
En ocasiones se dejan espacios huecos o colchones deformables que permitan el hinchamiento sin que aumenten las presiones, por ejemplo en el trasdós de un muro (Fig. 4, ref. 6) o mediante un forjado de planta baja.

La impermeabilización suele ser una buena ayuda para que no aumente la humedad, pero es difícil garantizar que sea total.



a) Movimientos estacionales del terreno descubierto b) Movimientos estacionales debajo de un edificio, a partir de su construcción.

Fig. 3



Solución adoptada en algunos edificios en Madrid para evitar el empuje lateral de las arcillas: ladrillos huecos forrando a la cimentación de hormigón (Jiménez Salas, 1965).

Fig. 4

Más discutida y dudosa es la alternativa de disponer un drenaje para evacuar y alejar el agua, pues con frecuencia se ha interrumpido u obturado, invirtiendo su papel y facilitando la entrada y distribución del peligro.

Una medida eficaz pero lenta es la estabilización con cal de la arcilla expansiva, para conseguir cambiar el catión sódico por el cálcico, reduciendo enormemente su actividad. Suele emplearse en subbases de carreteras, cimentaciones de canales de arcilla, mezclando la cal con el suelo. También se ha empleado con cierto éxito inyectando lechada de cal en terraplenes de ferrocarril contruidos con arcillas expansivas, logrando reducir el gasto de mantenimiento y conservación en pocos años.

En taludes en arcillas expansivas, la costra agrietada progresivamente durante el verano, crea con las primeras lluvias multitud de deslizamientos debido al empuje del agua que actúa como una cuña. Se producen deslizamientos de conchas parciales, del espesor de arcilla agrietada y alterada, que a su vez desestabilizan el talud más vertical que dejan aguas arriba, con una sucesión de corrimientos concomitantes que finalmente suman la altura total del talud, quedando una costra de material muy degradado, con la resistencia residual en su capa húmeda, con taludes estables finales que pueden alcanzar solo de 8° a 15°.

3- ROCAS

El fenómeno de hinchamiento se puede producir también en rocas, bien por aumento de la humedad o por otro cambio químico. Un caso frecuente y similar al de las arcillas expansivas mencionado es el de las margas arcillosas. En ellas puede agravar el problema la pérdida de cementación.

El paso de **anhidrita** (SO_4Ca) a yeso ($\text{SO}_4\text{Ca}+2\text{H}_2\text{O}$), a través de un posible paso intermedio por la bassanita ($\text{SO}_4\text{Ca}+\frac{1}{2}\text{H}_2\text{O}$), es muy conocido y puede implicar un cambio de volumen superior al 60%. El proceso es reversible (Fig. 5, ref. 10).

Aquí aparece la influencia de la diagénesis (ref. 5) o transformación de un material sedimentario por la presión y temperatura, sin llegar al grado del metamorfismo. A partir de los 50 a 100 m de profundidad la

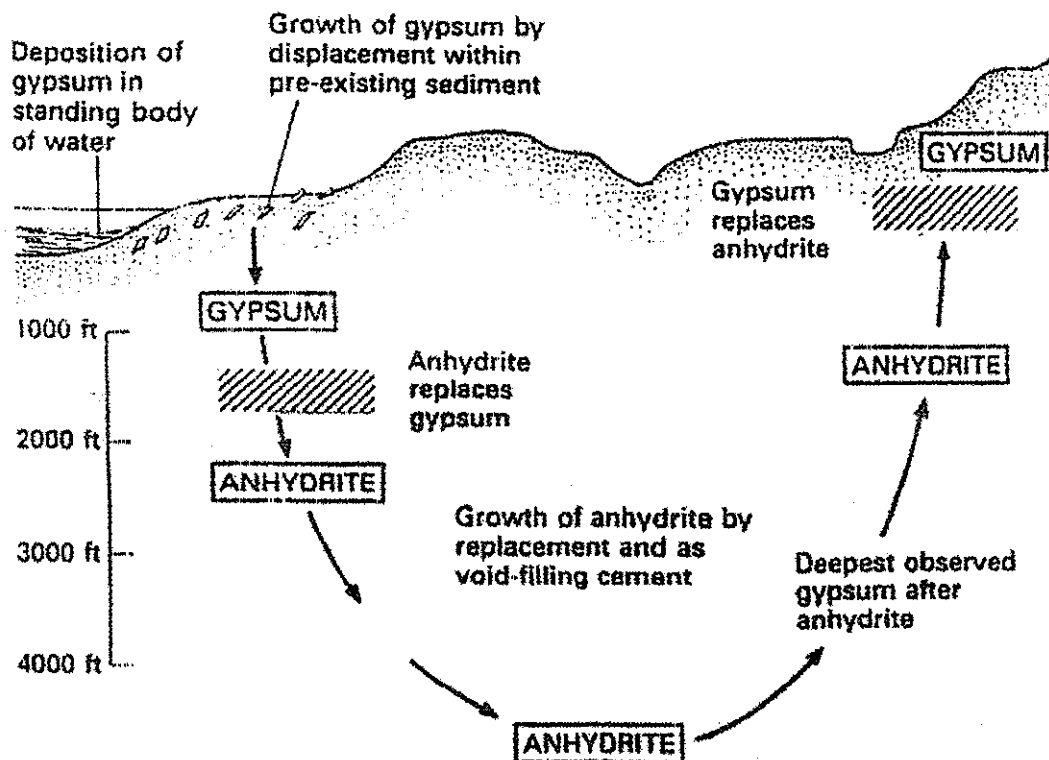


Diagrama esquemático ilustrando el ciclo diagénético yeso - anhidrita, según Murray (1964).

Fig.5

COTA	CUARZO	CALCITA	DOLOMITA	YESO	ANHIDRITA	FILOSIL.
39,0	2	48	23	9	2	9
37,5	10	34	30	17	1	8
27,8	8	31	17	14	11	17
26,0	7	31	22	11	12	9
21,1	10	32	18	11	14	15
17,2	9	35	19	5	15	15
8,5	12	32	21	4	22	9

TABLA Composición mineralógica media en %.

Fig.6

tensión vertical puede hacer que el yeso pierda sus moléculas de agua y se convierta en anhidrita. Al excavar un túnel y reducir la tensión, la anhidrita tiende a absorber la humedad del ambiente y convertirse en yeso. El fenómeno de hinchamiento puede por ello generarse no solo por inundación o aumento directo de la humedad, sino por la **decompresión**, que además de suponer una recuperación de la deformación elástica puede facilitar también la hidratación.

Este proceso es muy lento, ya que las partículas de anhidrita se recubren de una delgada capa de yeso que al ser impermeable la protege a corto plazo del progreso de la hidratación, pudiendo retrasarse años la aparición de las consecuencias.

Es significativa la tabla relativa a la variación gradual del porcentaje de anhidrita en un espesor de 30 m de una marga terciaria, correspondiente a la cimentación del edificio principal de una central eléctrica, que se elevó 15 cm a lo largo de varios años (Fig. 6, ref. 2).

Otro mineral que puede hinchar por hidratación es el olivino, generando la serpentina. El hinchamiento de la piritita y de la magnetita se produce en cambio por oxidación.

4- HELADA

Otra posibilidad de hinchamiento se genera en climas templados por la **helada**, cuando se congela el agua de los poros, ayudando la capilaridad a su crecimiento, estando el fenómeno influido por el tamaño micrométrico de las partículas, la disponibilidad de humedad y la permeabilidad del suelo. El deshielo provoca el consiguiente ablandamiento de los suelos, con los consiguientes asentamientos.

El problema se presenta también en construcciones en zonas de montaña, e incluso en cimentaciones de equipos frigoríficos.

En túneles alpinos se ha llegado a instalar calefacción en el pavimento, existiendo no solo el riesgo de congelación del firme, sino también el de formarse planchas de hielo en superficie.

5- HINCHAMIENTO EN TÚNELES

5.1- Modelos teóricos

El problema teórico de la excavación de un túnel se complica si al modelo elastoplástico del terreno se añade simultáneamente el problema de la presión intersticial, el flujo radial transitorio de agua y la consolidación del terreno y el posible hinchamiento del mismo. Serrano (ref. 7) ha planteado las ecuaciones diferenciales correspondientes, con gran generalidad, realizando integraciones analíticas y numéricas.

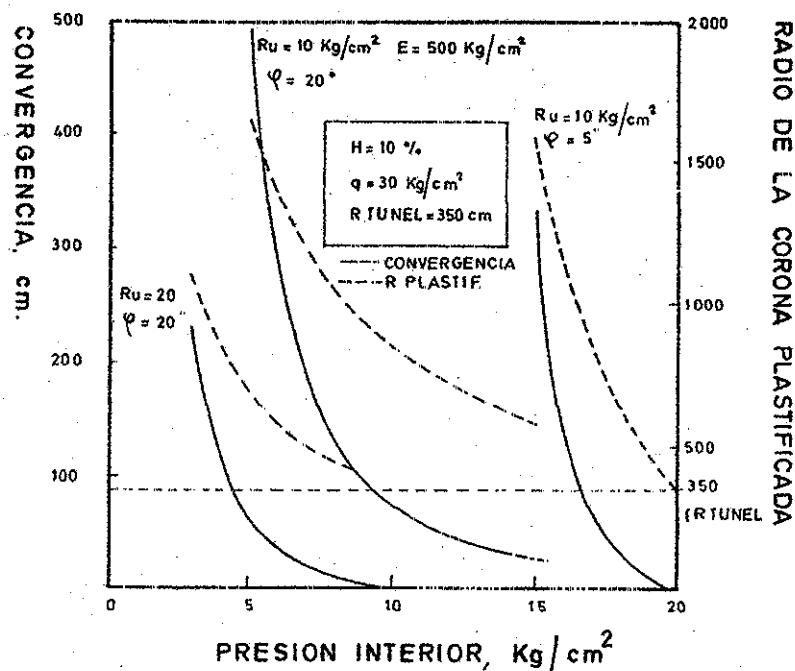
Considera sección circular con empuje al reposo unidad, es decir, el problema unidimensional en coordenadas polares cilíndricas. Analiza el caso de que la permeabilidad del terreno sea constante, o incluso que varíe como función del nivel de tensión efectiva en cada punto. Analiza también el caso del frente, suponiendo que es una semiesfera y aplicando coordenadas polares esféricas en vez de polares cilíndricas.

Explora la problemática de un caso tan complejo como el que tendría un túnel ferroviario de 7 m de diámetro a 400 m bajo el nivel del mar

en el estrecho de Gibraltar. Se adjunta parte de los tanteos y resultados obtenidos del radio de plastificación, la convergencia del túnel, la presión octaédrica inicial "q" a la profundidad del túnel, la presión interior resultante al final sobre el revestimiento, el % de hinchamiento H, etc. (Fig. 7 a 9).

Una de las conclusiones más interesantes (Fig. 10) es que cuando se permite el desarrollo de una gran convergencia por el hinchamiento del terreno, para sobre excavar a continuación y recuperar la sección interior deseada, puede optimizarse el proceso para minimizar la presión final a resistir. En este caso extremo como el del túnel del Estrecho, con los parámetros del terreno considerados, sería a costa de recortar un exceso de 15 m^2 , que es el 40% del área útil final.

El hinchamiento de una corona de terreno expansivo alrededor de un túnel ha sido analizado también por Lombardi (Fig. 11, ref. 9).



Fig, 7

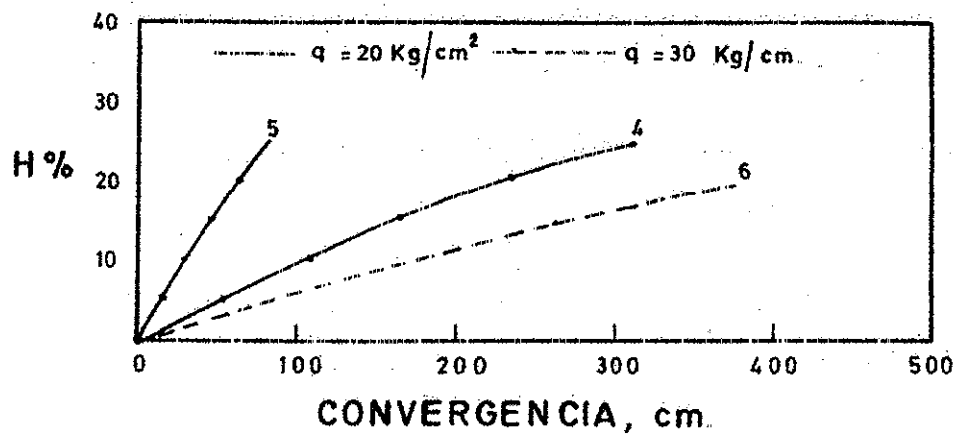


Fig 8.

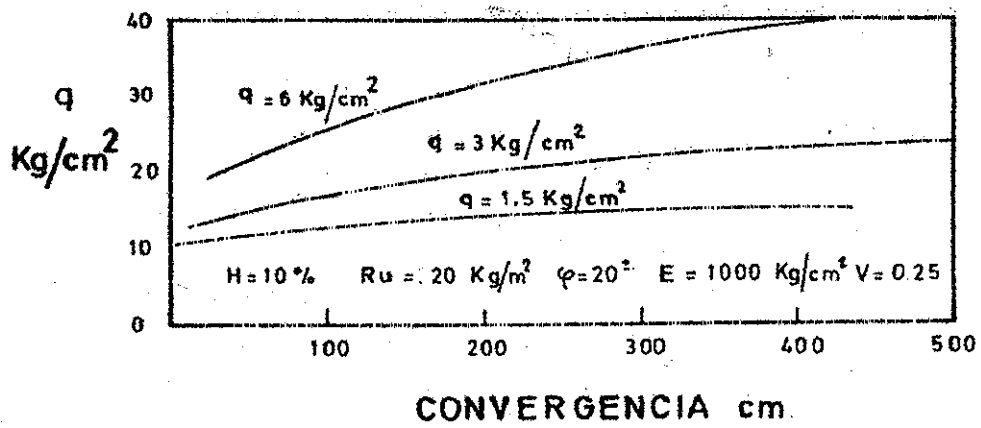


Fig 9.

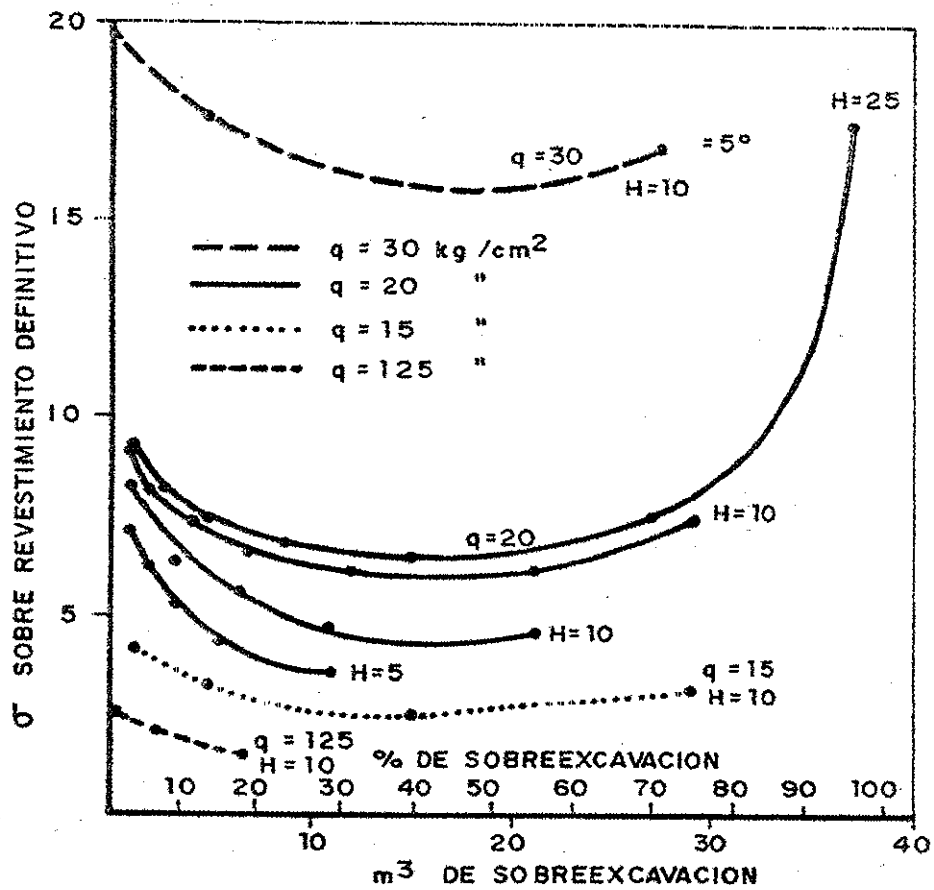


Fig. 10

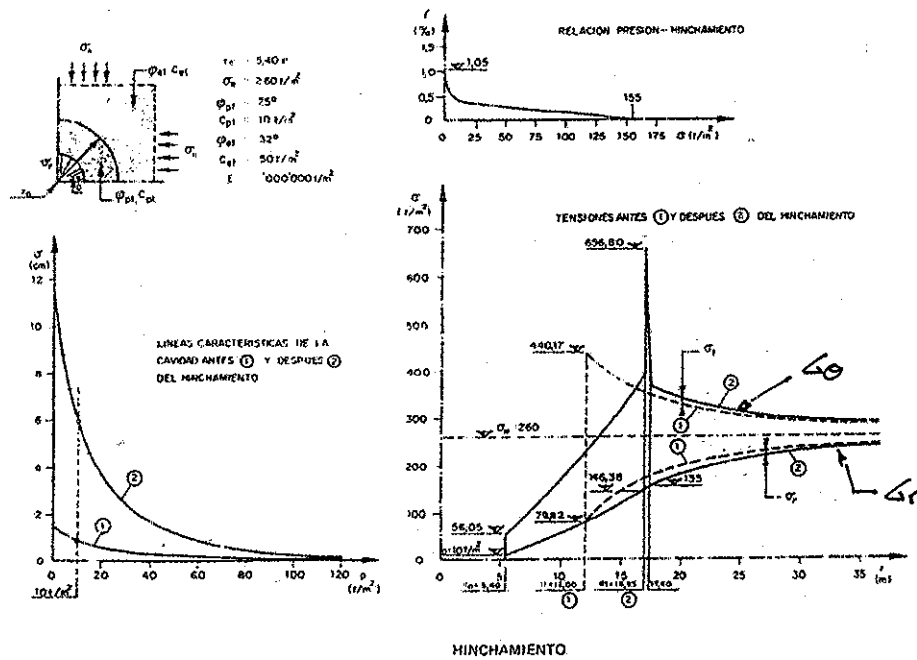


Fig. 11

5.2- Experiencia de diversas obras de túneles con fenómenos de hinchamiento

El hinchamiento del terreno alrededor de un túnel se traduce en una gran magnitud de las convergencias, presiones altas, con grandes empuje sobre los hastiales y con levantamiento de la solera, requiriendo el empleo de Contrabóveda. La zona de terreno que hincha teóricamente podría ser simétrica, pero realmente es mayor debajo del túnel, debido que ahí acude el agua de las filtraciones (Fig. 12, ref. 4), alcanzando un espesor similar al diámetro del túnel.

Se considera preferible no excavar por fases, sino a sección llena, con forma bastante circular, con contrabóveda robusta. Se discute si conviene permitir el hinchamiento para reducir las presiones finales, como se ha mencionado al tratar del túnel del Estrecho, pero en los casos de menor montera puede ser mejor impedirlo, para limitar así el volumen de la masa afectada y que finalmente intenta hinchar y presionar, evitando su degradación. Es aconsejable auscultar el túnel de modo específico.

Hay bastantes casos publicados de túneles alemanes, suizos, austriacos, franceses, etc. y centroeuropeos con graves problemas por hinchamientos de anhidrita, generalmente en terrenos del keuper (ref. 10).

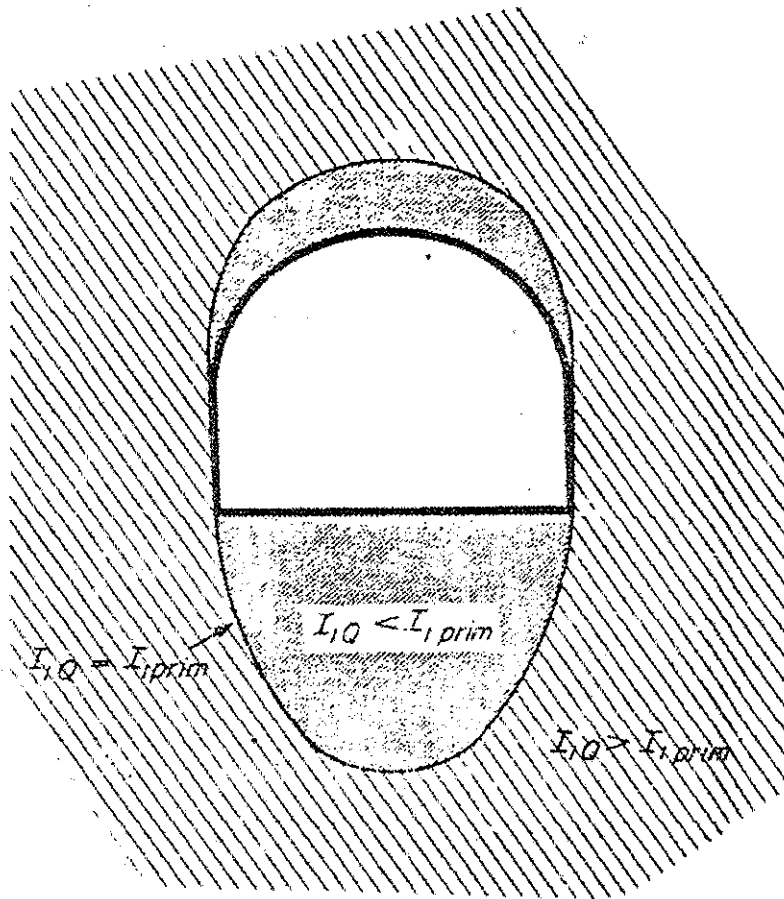
El túnel de Czernitzer se arruinó en medio mes, cerrándose su herradura y subiendo varios dm su solera (Fig. 13).

El centenario túnel ferroviario de Upper Hauentein en margas del Dogger tuvo que reducirse a su empleo para vía simple en lugar de vía doble.

El túnel de Bözberg, excavado en 1875 en arcilla expansiva opalina y anhidrita tuvo levantamientos de solera de 45 cm., e incluso se levantó la clave 5 cm., complicándose por la rotura de los drenajes.

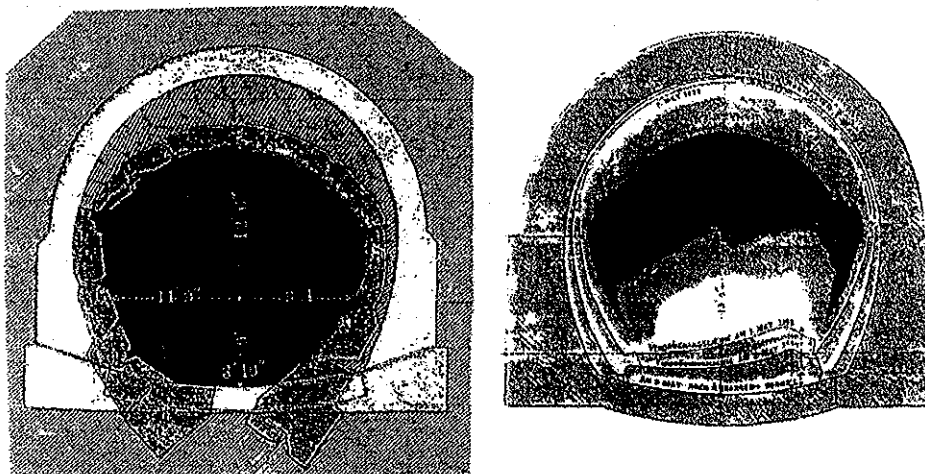
En el túnel de Kappellesberg, construido en 1980 en margas y anhidritas se redujo también a vía simple, después de rebajar 26 veces la solera, con un levantamiento acumulado de cerca de 5 m.

El túnel en keuper de Nagenburg, terminado en 1957 tras quince años de obra, con levantamientos de 5 cm/año, se tuvo que reconstruir en 1987



ZONAS DE HINCHAMIENTO EN TORNO A UNA CAVIDAD SUBTERRANEA

Fig. 12



Deformaciones en el Túnel de Czermitz asociadas a la transformación anhidrita-yeso.

Fig. 13

El túnel de Belchen, terminado en 1970, en keuper, llegó a levantar 90 cm, midiéndose en células de presión valores de empujes de 0,3 MPa. La contrabóveda se reconstruyó diseñada para soportar 0,85 MPa (Fig. 14).

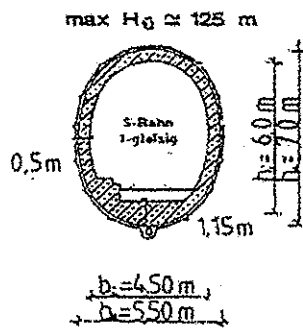
La Fig. 15 recoge diversas secciones tipo utilizadas en Alemania.

Los túneles de autovía de Fabares (ref. 3), con un tramo de 200 m en keuper, atravesaron una capa de 27 m de potencia en anhidritas, yesos laminados y argilitas, con montera de 200 m. Se consideró una presión de hinchamiento de 6 MPa, módulo elástico de 4000 MPa, ángulo de rozamiento de pico de 39° y cohesión $c'=0,14$ MPa, con ángulo de rozamiento residual de 20° , esperándose que el proceso de hinchamiento será muy lento, de años.

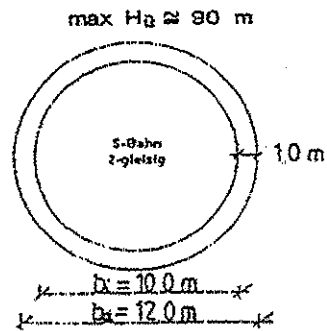
Se dispuso una forma casi circular, con hastiales bastante curvos y contrabóveda robusta y de gran curvatura, muy armada a flexión y a cortante. El ataque fue a sección completa, con sostenimiento inmediato de cuatro capas de hormigón proyectado que suman 35 cm, con dos mallazos intermedios y bulones de 4 m con bulbo de resina. (Fig. 16 y 17).

El revestimiento y la contrabóveda también se colocaban con rapidez, sin apenas permitir el desarrollo de las convergencias, cuidando la limitación del acceso de agua e intentando evitar la degradación de la roca. Se consiguieron avances de 80 m/mes.

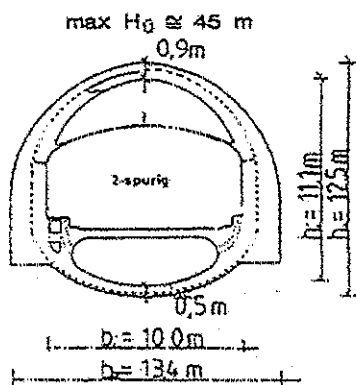
S-Bahn Stuttgart, Hasenbergtunnel:



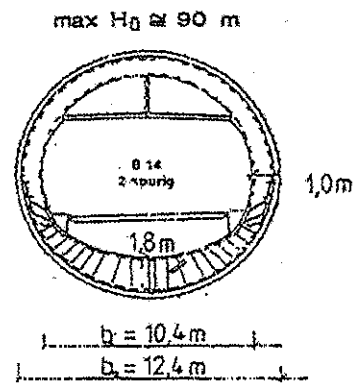
S-Bahn Stuttgart, Wendeschleife:



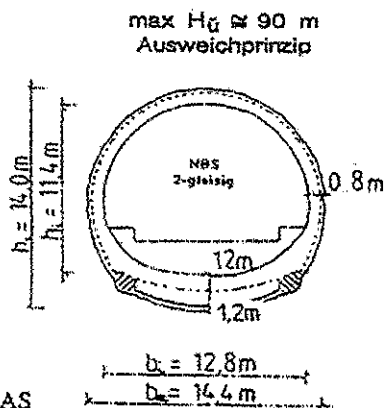
Wagenburgtunnel:



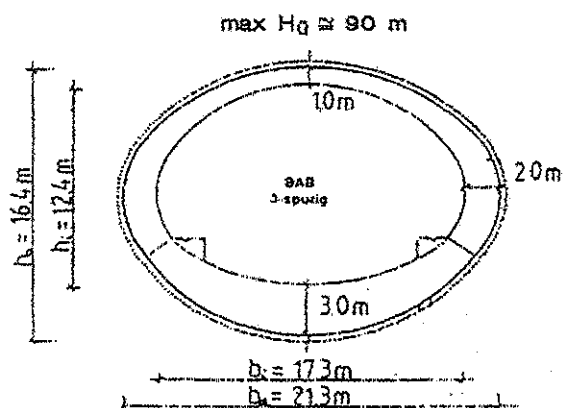
Tunnel Heselach II:



Freudensteintunnel:



Engelbergbasistunnel (Entwurf):



NOTAS

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

SECCIONES TÍPICAS UTILIZADAS EN ALEMANIA

Fig 14

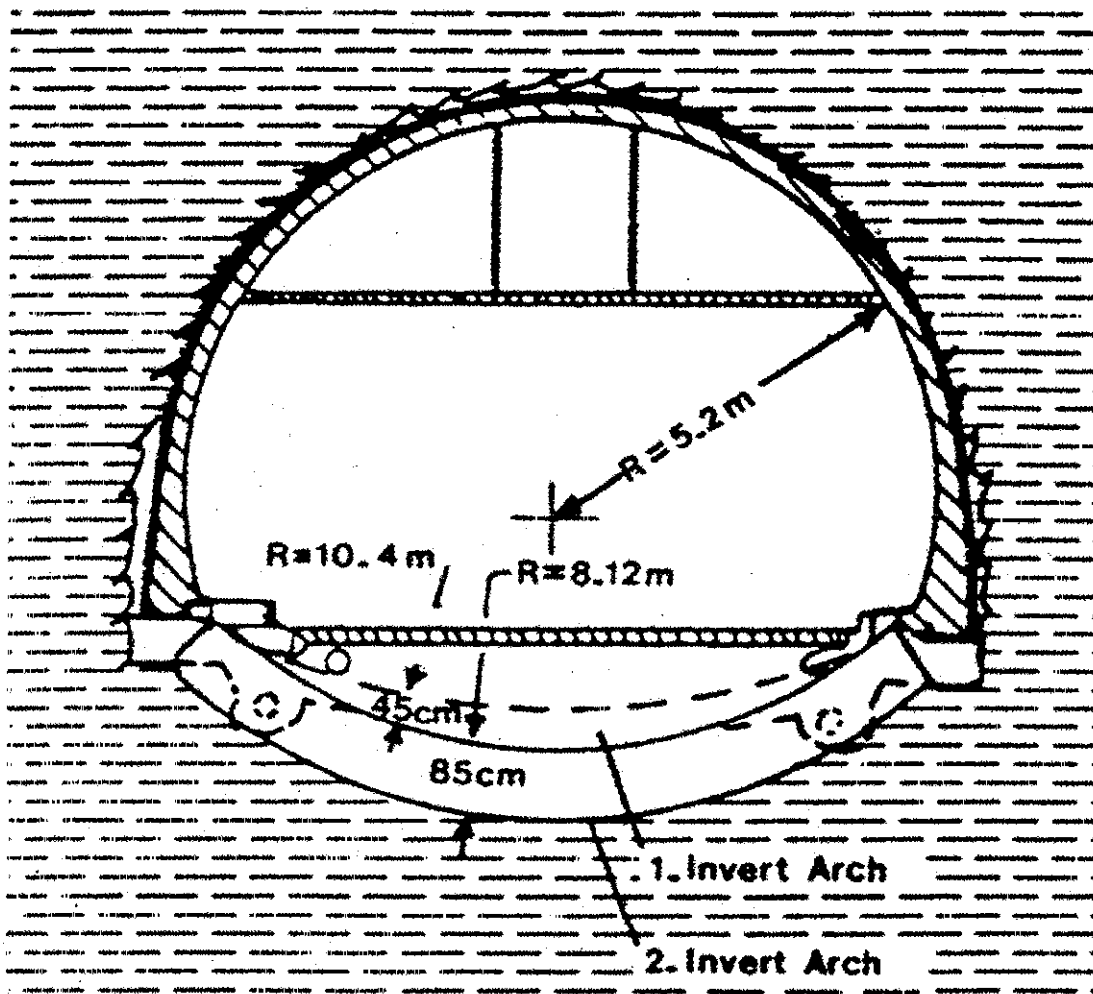


Fig. 15

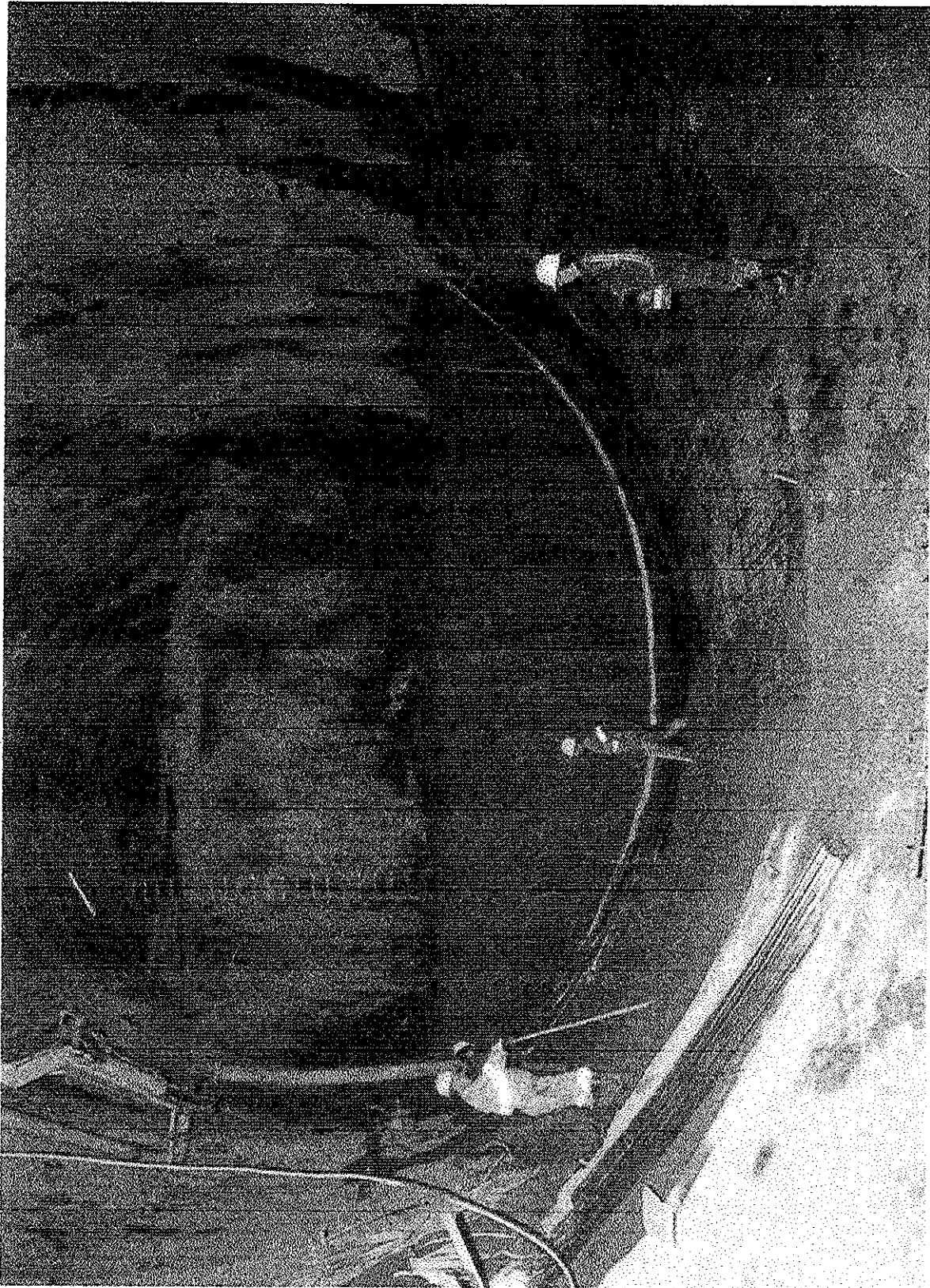


Fig 16.

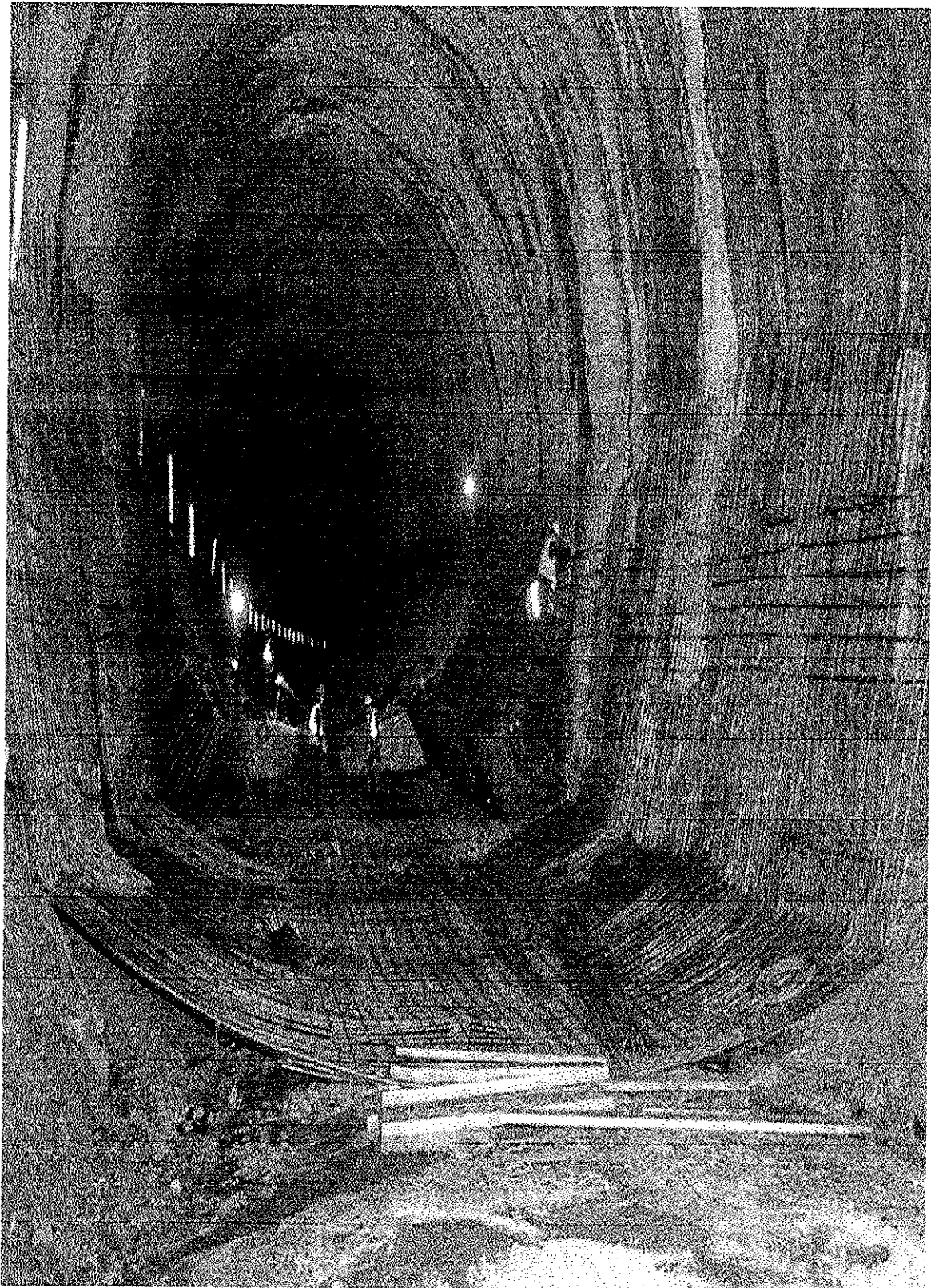


Fig. 17

BIBLIOGRAFÍA

- 1- Alonso, E., Lloret, A., Gens, A. y Batlle, F. "La predicción del hinchamiento de los suelos expansivos" Bolet. Soc. Esp. Mec. Suelos 95, jul. 1989, p. 3-10)
- 2- Esteban, F., Okan, A y Sagaseta, C. "Características del hinchamiento de ciertas margas yesíferas de la cuenca del Ebro" Bolet. Soc. Esp. Mec. Suelos 103, jul. 1991, p. 9-15.
- 3- García Arango, I. y Hacar, F. "Túneles en los tramos Lieres-Villaviciosa y Caravia- Llovio de la Autovía del Cantábrico". Obras Públicas. Número dedicado a "Ingeniería Subterránea", p. 92-103
- 4- Jiménez Salas, J.A. "Concepción y dimensionamiento de la sección del túnel" Simposio sobre túneles, Vol. 2 pp. 35-55. Madrid dic. 1974 Soc. Esp. Mec Suelos, AETOS y Soc. Mec. Rocas.
- 5- Jiménez Salas, J.A. y Justo Alpañés, J.L. "Geotecnia y cimientos I" 1975.
- 6- Jiménez Salas, J.A. "Geotecnia y cimientos III" Cap. 5 "Cimentaciones en terrenos expansivos o colapsables" 1980.
- 7- Jiménez Salas, J.A. y Serrano González, A "Condiciones geotécnicas del túnel bajo el Estrecho de Gibraltar" Rev. Obras Públicas. Jul-Ago 1984 p. 533-553.
- 8- Lambe, T.W. y Whitman, R.V. "Mecánica de suelos" 1969. Limusa-Willey
- 9- Lombardi, G. "Nociones generales sobre la estática de los túneles" " Simposio sobre túneles, Vol. 2 p. 125-141. Madrid dic. 1974. Soc. Esp. Mec. Suelos, AETOS y Soc. Mec. Rocas.
- 10- Roel, J. "Construcción de túneles en las anhidritas del Keuper. Túneles de Fabares"
- 11- Terzaghi, K. y Peck, R.B. "Mecánica de Suelos en la ingeniería práctica" 1948, edición en español 1955.
- 12- Wittkey, W. y Pierau, B. "Fundamentals for the design and construction of tunnels in swelling rock" 1979, IV Conf. Int. Rock Mech. Montreaux, Vol 2, p.719-729.