

# GEOMEC

BOLETIN DE DIVULGACION GEOTECNICA

TUNELES EN MACIZOS ROCOSOS

"INTRODUCCION AL ANALISIS GEOMECANICO"

POR GIANFRANCO PERRI (\*)



Nº 11

MAYO, 1982

caracas

TUNELES EN MACIZOS ROCOSOS  
"INTRODUCCION AL ANALISIS GEOMECANICO"

POR GIANFRANCO PERRI (\*)

(\*) Profesor de Mecánica de Rocas en la U.C.V.

## INTRODUCCION AL ANALISIS GEOMECANICO DE LOS TUNELES

### 1) ESTÁTICA DE LAS EXCAVACIONES PROFUNDAS:

Un elemento de terreno en el subsuelo, lejos de cualquier excavación o vacíos está sujeto, en primera aproximación, a una presión vertical dada por el producto  $\gamma H$  ( $\gamma$  = peso específico medio de los terrenos suprayacentes a la profundidad a la cual se encuentra el elemento considerado), llamada presión litoestática.

Tal presión determinaría una expansión lateral del elemento de terreno, función de sus características mecánicas de deformabilidad, si éste no estuviese confinado. Sin embargo debido a que el terreno circundante impide dicha expansión, se determinará en su puesto una presión sobre las superficies laterales del elemento (empuje lateral), proporcional a  $\gamma H$  según un coeficiente ( $K_0$ ) llamado de empuje lateral en condiciones de reposo.

En tales condiciones de sollicitación (estado de compresión triaxial), no se verifican fenómenos de ruptura cualquiera que sea el valor de la presión litoestática, con que el empuje lateral sea suficientemente grande para garantizar la estabilidad; y dado que este empuje aumenta proporcionalmente a la presión litoestática hasta justamente lograr va

lores necesarios para evitar la deformación lateral, la estabilidad de un elemento de terreno en el subsuelo lejos de todo vacío está siempre asegurada.

Ahora bien la creación de un vacío en un determinado punto y profundidad del subsuelo, modifica (obviamente en sentido desfavorable a la estabilidad) el estado de sollicitaciones en la roca inmediatamente circundante la excavación misma, debido a dos órdenes diferentes de fenómenos:

- a) La eliminación de un cierto volúmen de terreno determina que la carga vertical inicialmente soportada por el mismo, se transfiera sobre el terreno adyacente que ha quedado en el sitio; en otras palabras se verifica una concentración de esfuerzos verticales que puede ser muy grande (2 - 3 y más veces la presión litoestática original).
  
- b) La eliminación del impedimento lateral contra la expansión del terreno hace que éste, alrededor de la excavación, ya no esté sujeto a compresión triaxial y sea libre de deformarse y, si los esfuerzos son suficientemente elevados, de romperse.

En efecto puede afirmarse que en cualquier terreno, a partir de una profundidad dada (función de las características mecánicas y geoestructurales del macizo, además que

del tamaño y forma de la cavidad) la estabilidad de la exca  
vación debe ser asegurada artificialmente mediante la crea-  
ción de obras de sostenimientos.

Estas, en consideración del hecho que normalmente son pues  
tas en obra después de realizada la excavación, no esperan  
reconducir los terrenos circundantes a su estado de solici  
tación original (lo que sería prácticamente imposible) sino  
evitar (indefinidamente o por un tiempo más o menos largo se  
gún el tipo y función de la obra) que los terrenos puedan  
invadir el vacío creado por la excavación.

Más específicamente podrían mencionarse, como principales,  
las siguientes posibles funciones para las cuales, conjunta  
o individualmente, se diseña y se pone en obra el sosteni-  
miento de un túnel:

- a) Sostener elementos de rocas aislados por alguna disconti  
nuidad, los cuales caerían en la cavidad desde el techo  
o las paredes laterales de la misma (es el caso de túne  
les excavados en rocas competentes y a pequeñas profundi  
dades, cuyas paredes serían autoestables en ausencia de  
lesiones);
- b) Sostener el peso de la roca contenida en un dado volúmen  
alrededor de la cavidad, en el cual se han determinado

solicitaciones y luego fracturaciones excesivas, mientras que externamente a dicho volúmen se ha constituido una superficie natural autoestable.

- c) Determinar, impidiendo el deslizamiento del terreno hacia el vacío, el regreso a un nuevo estado de compresión triaxial en el terreno, compatible con la estabilidad de la excavación durante un tiempo o más o menos largo;
- d) Transformar en autosostenimiento un espesor de terreno alrededor de la cavidad, impidiendo los deslizamientos relativos de los elementos en que podría dividirse la roca misma (por ejemplo mediante la aplicación de pernos de anclajes que ligen entre ellos los estratos).

Estas estructuras de sostenimiento pueden ser discontinuas, o sea constituidas por una sucesión de elementos resistentes y separados entre ellos, o en otros casos, en los que se denominan comúnmente revestimientos, están constituidas por una estructura resistente continua. A veces, para grandes obras, se utiliza los dos tipos al mismo tiempo: el primero con la función de sostenimiento primario y el segundo con la función de sostenimiento definitivo.

Para lo que se refiere a las tipologías, materiales y métodos de construcción de los sostenimientos, deberían emplear

se muchas páginas para su descripción aunque sumaria y general; lo que en todo caso caería afuera de los límites e intenciones de este trabajo. Puede solamente mencionarse que hoy en día, y especialmente para obras de cierta envergadura, se emplean sostenimientos metálicos y en concreto, mientras que ya no se justifica técnicamente el uso de madera y otros materiales de mampostería.

Igualmente conviene desde ya señalar, que, desde el punto de vista de la mecánica de rocas y del cálculo de las cargas sobre los sostenimientos y luego del dimensionamiento de los mismos, la principal característica de la estructura de sostenimiento que entra en juego es su rigidez, o en otras palabras su actitud a permitir deformaciones más o menos grandes bajo las cargas de los terrenos. A este respecto, que es en realidad un problema de rigidez relativa y de interacción terreno-estructura, está ligada la problemática fundamental del análisis y cálculo de los sostenimientos de los túneles así como se tendrá oportunidad de examinar más adelante.

## 2) LAS CARGAS SOBRE LOS SOSTENIMIENTOS:

La carga que actúa sobre el sostenimiento de un túnel es el producto de un típico fenómeno de deformación y rotura. En efecto si se imagina que se pudiese excavar un túnel y construir su revestimiento sin alterar el estado de solidi

citaciones al que está sometido el macizo, el esfuerzo inicial sobre el revestimiento sería igual a dicho estado de sollicitaciones. La fuerza vertical sobre el túnel alcanza ría un valor igual al peso total de la roca que lo cubre y la presión horizontal tendría la magnitud  $(K_0 \gamma H)$ . De una manera general, la superficie exterior del revestimiento estaría sometida a un estado de tensiones normales y tangenciales, las que serían iguales a las sollicitaciones propias naturales del macizo en los distintos planos tangentes a dicha superficie.

No es necesario decir que el razonamiento efectuado representa una situación puramente imaginaria. Todos los métodos constructivos utilizados para excavar túneles exponen, por lo menos durante un cierto tiempo, su superficie interior y la roca debe, durante este período, sostenerse por sí misma.

Este simple hecho modifica radicalmente el estado de sollicitaciones del macizo en las inmediaciones del túnel: las tensiones normales a lo largo de su superficie perimetral se reducen a cero y se produce una redistribución de las tensiones tangenciales.

En cuanto específicamente se refiere a las cargas sobre los sostenimientos, hay que enfatizar el hecho que el problema del sostenimiento de una galería subterránea es

un problema estáticamente indeterminado o hiperestático. En realidad excavar una galería significa eliminar un núcleo de roca muy rígido y sustituirlo por una estructura cualquiera de sostenimiento, mucho más deformable. Durante esta operación la cavidad creada tiende a cerrarse y se vé inmediatamente que la solución final dependerá de la forma en que se introduzca el cuerpo extraño que es la estructura de sostenimiento, dependiendo además del momento en el que se realice esta operación. De esto resulta que el empuje que actuará finalmente sobre el revestimiento o sobre la entibación será el resultado de la interacción de los diversos factores mencionados y que, contrariamente a una opinión todavía muy difundida, esta carga no es un valor natural dado a priori.

Hay que repetir que la intensidad de esta reacción dependerá entre otro del momento de la colocación del revestimiento, de su rigidez y sobre todo de las deformaciones que el terreno haya sufrido hasta el momento.

Con el objeto de aclarar un tanto más los conceptos que se acaban de expresar, puede hacerse recurso a otra esquematización extrema del fenómeno de la excavación de un túnel, en la que se imagine una galería circular bajo un estado de sollicitación natural del terreno de tipo hidroestático, y con un sostenimiento constituido por una membrana perfectamente deformable. Adicionalmente debe asu-

mirse que en el interior del túnel, exista una presión uniforme regulable, por ejemplo un líquido, que puede mantener el terreno en equilibrio. (Fig. 1).

Al principio se asume que dicha presión interna equivalga exactamente al estado de esfuerzos natural hidroestático existente y por lo tanto en las paredes del túnel no ocurrirá ningún tipo de deformación. Ahora bien, si se disminuye la presión interna gradualmente, el radio de la excavación comenzará a disminuir como consecuencia de una deformación (inicialmente elástica) del terreno en correspondencia de las paredes del túnel y en un primer instante esta deformación habrá seguido las leyes de la elasticidad y estará representada, por tanto, por un tramo recto (A-B) en el gráfico de la misma figura 1. A partir de un cierto momento se producirán en el caso más general, en torno a la cavidad fenómenos de rotura y de plasticidad, de forma que el aumento de la deformación se producirá de forma no proporcional a la disminución de la presión interna de estabilización (tramo B-C) y la curva se inclinará bastante más rápidamente.

Pueden presentarse dos casos: el primero, para el cual las deformaciones crecen sin límite al disminuir la presión interna hasta el hundimiento de la cavidad. Se trata, por tanto, de una cavidad que no es estable por sí misma. La otra posibilidad, es aquella según la cual

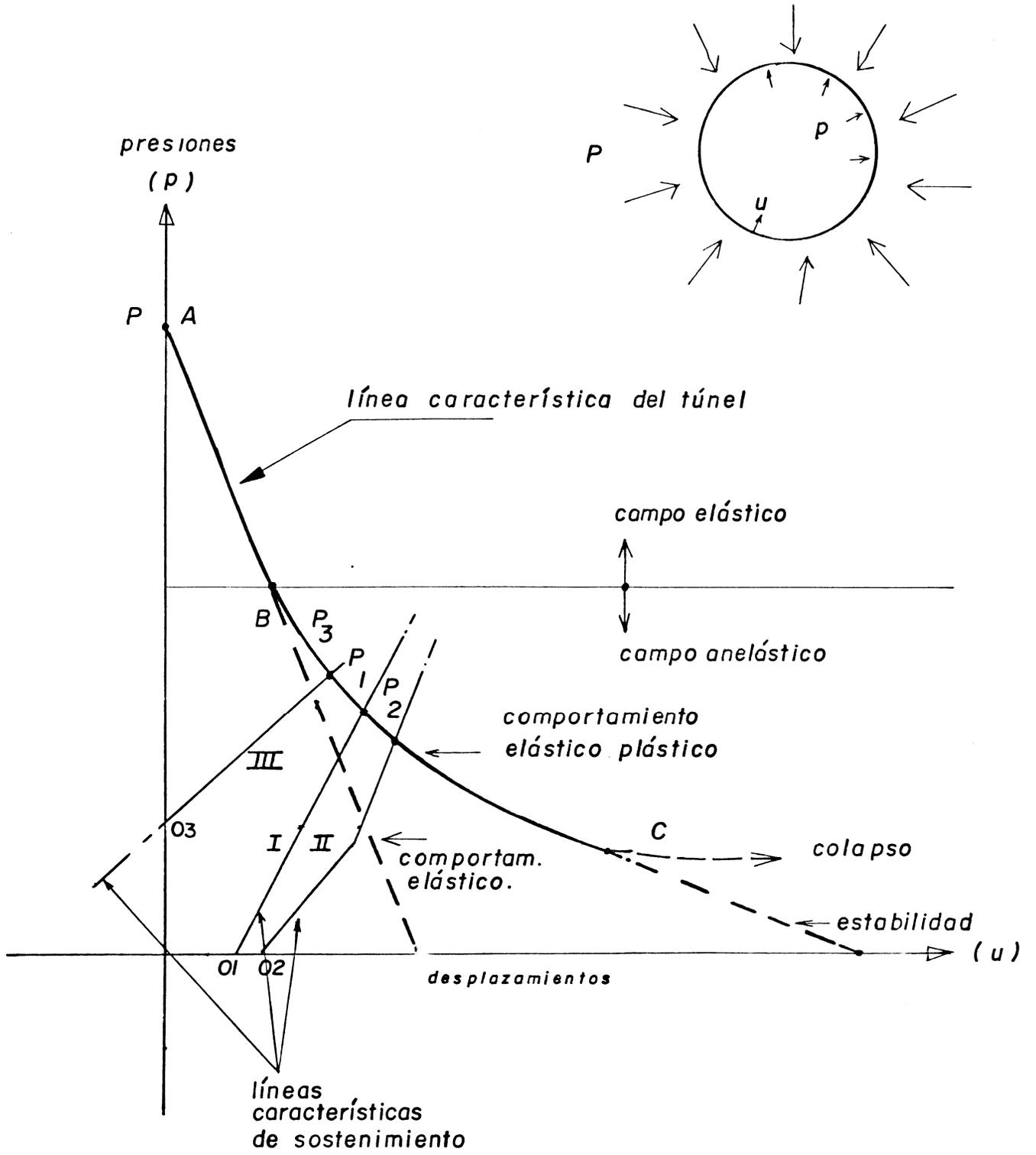


FIG. -1-

la curva corta al eje de deformaciones en un punto ca racterizado por valor finito de aquellas. En este ca so la cavidad sería estable incluso sin sostenimiento.

Evidentemente, si el comportamiento del terreno fuera puramente elástico, la línea característica sería una recta que se prolongaría hasta cortar el eje de las de formaciones mientras que en el caso contrario, es de- cir en presencia de deformaciones plásticas, se tendrá una línea curva.

En la realidad los sostenimientos aplicados no poseen las características de la membrana mencionada capaz de ajustarse a cualquier tipo de deformación impuesta por el terreno. Se trata en efecto de estructuras de acero o concreto las cuales son relativamente rígidas y ocu- rrirá que las deformaciones radiales de las paredes ro cosas del túnel deberán ser congruentes, o sea coinci- dir, con las deformaciones radiales del sostenimiento. Se debe entonces definir el comportamiento de éste úl- timo, o sea la curva característica (presión-deformación) del sostenimiento y buscar por confrontación con la ante rior (presión deformación de las rocas de las paredes del túnel) el punto de equilibrio.

En la misma figura 1 se han representado, en relación con las líneas características de la cavidad, las de di

versas estructuras de sostenimiento. La línea I corresponde a un revestimiento rígido-elástico; la línea II a la combinación de un primer revestimiento deformable con un segundo revestimiento más rígido, colocado posteriormente; la línea III representa el caso de anclajes pretensados para los cuales la deformación en ausencia de fuerzas sería negativa.

La intersección de la línea característica de la cavidad con la del sostenimiento proporciona el punto de equilibrio, es decir la solución del problema hiperestático. Los diversos puntos  $P_1$ ,  $P_2$  y  $P_3$  representan otros tantos estados de equilibrio posibles, correspondiendo cada uno de ellos a un tipo de sostenimiento dado. En general cada punto de la línea característica del túnel representa un posible estado de equilibrio teórico y corresponde a un valor posible de la presión de montaña.

Este hecho es de la máxima importancia, ya que vuelve a confirmar que la carga de la masa rocosa sobre un sostenimiento no está determinada a priori sino que depende:

- del estado de sollicitación natural del macizo.
- de las propiedades mecánicas del terreno.
- de la rigidez y deformabilidad del revestimiento o

- del sostenimiento y, en particular,
- del procedimiento constructivo.

La figura 1 muestra todos estos factores:

El estado natural de sollicitación P fija el origen de la línea característica de la cavidad. Las propiedades mecánicas del terreno determinan la forma. La deformabilidad del sostenimiento se representa por la línea característica correspondiente, mientras que el procedimiento constructivo usado permite precisar el origen de esta línea característica ( $0_1 - 0_2 - 0_3$ ).

De hecho existen métodos de cálculo, de uso corriente, que permiten calcular la línea característica de una cavidad en función de las propiedades mecánicas del terreno y de los demás parámetros, si bien no se puede dar ninguna indicación respecto a la posición relativa de las dos líneas características del revestimiento o de la cavidad.

En efecto la incógnita hiperestática que interesa es el valor de deformación inicial del túnel al momento de la puesta en obra del sostenimiento, y para resolver este problema será necesario examinar la zona del frente de excavación, con extremo detalle.

Aunque el problema reviste obviamente una más amplia complejidad, debiéndose incluir en los análisis los factores tiempo y los aspectos reológicos en general, cuanto ilustrado, aunque en forma solamente cualitativa permite fijar la siguiente conclusión sobre el problema de la determinación de las cargas sobre los sostenimientos en túneles:

- Los esfuerzos ejercitados por el terreno sobre el sostenimiento de un túnel, no son de magnitud ligada a priori a la naturaleza del sitio y entonces intrínsecos a la "montaña", sino que son el resultado de la interacción entre el estado de sollicitaciones natural existente en el sitio, las propiedades mecánicas del macizo rocoso, el método de construcción elegido para la obra y el tipo de sostenimiento: especialmente su rigidez (Lombardi, 1975).

### 3) MÉTODOS EMPÍRICOS, ANALÍTICOS Y NUMÉRICOS:

Tradicionalmente, para el diseño de los sostenimientos de túneles, han sido utilizados métodos empíricos y semiempíricos.

Estos métodos, por ejemplo Terzaghi (1946), Deere (1969), Whickham (1972), Bienawski (1974), Barton (1974), se prestan muy eficientemente para ser empleados en las

etapas preliminares del diseño en las cuales la información geotécnica sobre las condiciones del subsuelo se conoce por lo general en términos solamente cualitativos.

Sin embargo una formulación racional en términos analíticos, también para estas fases del diseño, presentaría muchas ventajas sobre los métodos empíricos.

Por ejemplo entre otras, según Schwartz (1978):

- a) Los métodos analíticos no dependen fuertemente de la experiencia previa, permitiéndose su utilización por parte de ingenieros con menor experiencia profesional y en todo caso cuando no se dispone de experiencia relevante sobre el tipo de macizo rocoso en que se proyecta construir el túnel.
- b) En las fases preliminares del diseño, cuando se dispone de muy poca información cuantificada, esta puede ser utilizada directamente en los procedimientos analíticos, y las condiciones geológicas cualitativas más abundantemente disponibles pueden ser usualmente correlacionadas con algún parámetro cuantificado, pudiéndose utilizar el proceso analítico para la calibración misma de la correlación.

- c) Los métodos analíticos pueden resultar muy efectivos durante las etapas de ajustes y adaptación iniciales del proyecto, pudiéndose ir incorporando de manera inmediata y directa toda la información cuantitativa a medida en que ésta se vá recopilando, no siendo necesario el empleo de una clasificación cualitativa del macizo como paso intermedio.
  
- d) Puede ser cuantificado el factor de seguridad del diseño.
  
- e) Idealmente, los métodos analíticos de diseño constituyen el medio más eficaz hacia el logro de un tratamiento más completo en la determinación de los niveles de riesgo y en la optimización del diseño de los sostenimientos de túneles.

Adicionalmente, ya ahora haciendo referencia a una comparación con los métodos numéricos, pueden añadirse las siguientes ventajas ofrecidas por las soluciones analíticas:

- a) Menor costo de ejecución, incluyendo en este aspecto la falta de necesidad de uso de medios complejos de cálculo sea como "hardware" sea como "software".

- b) mayor rapidez de solución y por consecuencia mayor versatilidad en los procesos de ajuste, adaptación, modificación y análisis de sensibilidad paramétrica.
  
- c) Mayor o más natural compatibilidad entre los niveles de precisión y detalle de los "inputs" de los métodos de cálculo, en relación con los "inputs" reales comumente disponibles en las varias etapas del proyecto de un túnel, especialmente los relativos al macizo natural.

Aunque existen muchas soluciones analíticas para el diseño de túneles, cada una de las cuales con sus alcances y limitaciones específicas, pueden individualizarse por lo menos dos características generales comunes a todas las soluciones:

- a) Asunción de un modelo de medio contínuo para el subsuelo.
  
- b) Asunción de condiciones de deformaciones planas para la sección del túnel.

Por supuesto ambas características imponen importantes limitaciones a todos los métodos posibles de análisis y diseño.

En cuanto a las características específicas de las distintas soluciones disponibles, éstas pueden agruparse como sigue:

a) Soluciones elásticas sin soporte:

Con las que pueden considerarse los casos siguientes:

- Medio elástico lineal isotrópico y anisotrópico.
- Cavidades múltiples y aisladas.
- Formas circulares y otras figuras geométricas regulares.
- Estado de sollicitación inicial arbitrario.
- Eventual presencia de presiones internas a la cavidad.

Los "inputs" necesarios son: los módulos de elasticidad y el estado de sollicitación inicial.

b) Soluciones elastoplásticas sin soporte:

Con las que pueden considerarse los casos siguientes:

- Medio elasto-plástico isotrópico.
- Diferentes criterios de plastificación.
- Diferentes comportamientos post-plastificación.
- Cavidades aisladas de forma circular.

- Estado de sollicitación inicial isotrópico y uniforme.
- Eventual presencia de presiones internas a la cavidad.

Los "inputs" necesarios son: los módulos de elasticidad, los parámetros que definen el criterio de plastificación adoptado, los parámetros que definen el comportamiento post-plastificación y el estado de sollicitación inicial.

c) Soluciones elásticas con soporte:

Con las que pueden considerarse los casos siguientes:

- Medio elástico línear isotrópico.
- Cavidades aisladas de formas circulares o elípticas
- Estado de sollicitación inicial arbitrario.
- Condiciones de cargas preexistentes o siguientes a la excavación.
- Condiciones de perfecta adherencia o perfecta inadherencia al contacto terreno-sostenimiento.

Los "inputs" necesarios son: los módulos elásticos del terreno y del sostenimiento, las propiedades geométricas de la sección del sostenimiento y el estado de sollicitación inicial.

d) Soluciones viscosas:

Con las que pueden considerarse los casos siguientes:

- Medio viscoelástico lineal isotrópico.
- Cavidades aisladas de forma circular.
- Estado de sollecitación inicial isotrópico y uniforme.
- Eventual presencia de presiones internas a la cavidad.

Los "inputs" necesarios son los módulos elásticos y los parámetros viscosos del terreno y el estado de sollecitación inicial.

Esta esquemática presentación de las características principales de los métodos analíticos actualmente disponibles para el diseño de túneles, puede directamente utilizarse con el objeto de señalar todas las limitaciones intrínsecas al uso de éstas soluciones.

En efecto la lista de los casos y circunstancias que no pueden considerarse en los varios métodos, sería ciertamente mucho más larga que las listas que se han presentado para ilustrar los alcances de cada uno de los cuatro grupos de métodos analíticos descritos.

Podrían quizá, únicamente a manera de ejemplo, mencionarse los siguientes aspectos que no pueden considerarse en las soluciones analíticas:

- Análisis tridimensional de los frentes de excavación.
- Heterogeneidades en los macizos.
- Geometrías complejas e irregulares de las cavidades.
- Análisis de los procedimientos constructivos.
- Irregularidades en las condiciones de contorno.

Con lo anterior resultan evidentes los límites de todas las soluciones analíticas, mientras que son los métodos numéricos, el método de los elementos finitos en particular, los únicos que hoy en día permiten de alguna manera incluir en los análisis y cálculos la mayor parte de los hechos, parámetros y circunstancias relacionadas y relacionables con la construcción y funcionamiento real de una obra tan compleja como es todo tipo de túnel.

Finalmente, es necesario aclarar que los logros mencionados, alcanzables mediante el uso de métodos numéricos de cálculo por elementos finitos, son posibles solamente a cambio de costos y tiempos elevados los cuales aumentan rápidamente con el nivel de sofisticación de los modelos y códigos de cálculo hoy en día disponibles y quizás a menudo de uso no justificado si relacionados con la general pobre definición disponible para las condiciones geomecánicas y reológicas reales del subsuelo.

En efecto, la evolución de estos métodos numéricos ha sido paralela al rapidísimo desarrollo de los medios electrónicos de cálculo y ha sido tan asombrosa que, en lo que específicamente se refiere el campo de la geotécnica, puede tranquilamente afirmarse que esta evolución es sobrada: ciertos métodos de cálculo numérico son teóricamente tan versátiles y potentes que la limitación práctica para su aplicabilidad en geotécnica lo representa la insuficiente capacidad de poder suministrar los "inputs" con el grado de detalle tan avanzado que los códigos de cálculo pueden recibir y elaborar.

Es por estas razones que probablemente el justo equilibrio está, como casi siempre, en el medio: es tan incorrecto e involuto querer seguir utilizando métodos de análisis y cálculo superados y con evidentes fallas conceptuales y/o suposiciones injustificadamente demasiado conservadoras, como es tan incorrecto y utópico querer introducir en los métodos de análisis procedimientos de cálculo extremadamente sofisticados y necesariamente muy costosos cuyas supuestas teóricas rigurosidad y precisión matemáticas se estrellan contra la realísticamente incierta aproximación física que puede hoy en día lograrse para la definición del comportamiento y de los parámetros naturales propios del terreno.

Para concluir este capítulo se presenta una tabla resumen de los principales métodos geotécnicos de análisis y diseño para túneles.

METODOS GEOTECNICOS DE ANALISIS Y DISEÑO

- METODOS EMPIRICOS:

- TERZAGHI (1946)
- LAUFFER (1958)
- DEERE (1969)
- PROTODIAKONOV (1970)
- WHICKHAM (1972)
- BIENIAWSKI (1973)
- LOUIS (1974)
- BARTON (1974)

- METODOS MATEMATICOS:

Analíticos:

- ELASTICIDAD PLANA
- ELASTO PLASTICIDAD
- RIGIDEZ RELATIVA
- LINEAS CARACTERISTICAS

Numéricos: M.E.F.

Los métodos de diseño denominados empíricos son aquellos que no se basan sobre formulaciones teóricas sino simplemente sobre la experiencia y la observación del comportamiento real de las estructuras, y con ellos se pretende establecer criterios, lo más simples posibles, que permitan sobre la base de pocos y claros datos, clasificar el subsuelo y por consecuencia definir en forma más o menos precisa la necesidad y características del sostenimiento en unos casos, o los valores de las cargas sobre estos sostenimientos en otros casos.

Los métodos matemáticos, por el contrario se basan en asunciones teóricas sobre el comportamiento mecánico del subsuelo y pretenden llegar a la definición de fórmulas o datos numéricos para el cálculo estructural de la obra; en unos casos, limitándose a la determinación del estado tensional alrededor de la excavación o las cargas sobre las estructuras de sostenimiento y, en otros casos llegando hasta el dimensionamiento estructural de la obra completa.

Los métodos analíticos, normalmente hacen recurso a hipótesis muy simplificativas sobre el comportamiento mecánico de las estructuras involucradas (subsuelo y sostenimiento), así como sobre la geometría y condiciones de contorno del problema.

Los métodos numéricos, basados sobre el uso del M.E.F., superan muchas de las restricciones anteriores y representan sin dudas, el método de cálculo más potente y prometedor que existe al momento. Por el contrario, el M.E.F. encuentra limitaciones en el costo de aplicación debido a la necesidad de disponer de potentes máquinas de cálculo y de muchas informaciones en la definición de los " inputs " .

A manera de información adicional en las tablas que siguen se resumen respectivamente, las principales soluciones analíticas en forma cerrada y las principales soluciones numéricas mediante el M.E.F., directamente aplicables a problemas de diseño de túneles.

PRINCIPALES  
SOLUCIONES  
ANALITICAS

Investigators	Date	Lined Tunnel	Unlined w/ Internal Pressure	K <sub>f1</sub> Initial Stresses	Variation of Stress w/ Depth	Elastic Ground Properties	Inelastic Ground Properties	1) Reduced Residual Strength	2) Dilatacy	Ground Movements Before Support	Time Effects	Remarks
Kirsch	1898											
Bjorkman & Richards	1976		X	X		X						Inverse Elasticity Problem
Daemen & Fairhurst	1972	X				X				X		
Fenner	1938		X		X		X					Cohesionless Ground
Green & Taylor	1945			X		X						Anisotropic Ground Behavior
Kastner	1962						X					Two Solutions
Ladanyi	1974		X				X	X	X		X	Empirical Dilatacy Coefficient
Lombardi	1973		X			X	X			X		
Mindlin	1940/48			X	X	X						Includes Effect of Ground Surface
Newmark/	1969		X				X	X				Basis for Hendron & Aiyer
Hendron & Aiyer	1972	X	X				X	X	X			Detailed Elasto-Plastic Solution
Peck, Hendron, Mohraz/	1972	X		X		X						
Hoeg/	1965/68	X		X		X						Relative Stiffness Solution
Burns & Richard	1964	X		X		X						
Rabcewicz	1973	X		?			X	X				Shear Body Analysis
Savin	1970	X	X	X		X	X		?			Conformal Mapping Approach
Terzaghi & Richart	1952			X		X						2-D & 3-D Unlined Openings



## REFERENCES

- Abraham, K.H., Barth, St., Brautigam, F., Hereth, A., Müller, L., Pahl, A., Rescher, C.J. (1974), "Vergleich von Statik, Spannungsoptik und Messungen beim Bau der Kaverne Waldeck II." *Rock Mechanics, Supplementum* 3, pp. 143-166.
- Abraham, K.H. and Pahl, A. (1974), "Planung und Berechnung grosser Felsbauten unter Berücksichtigung felsmechanischer Kontrollmöglichkeiten," (in German), 3rd International Conference on Rock Mechanics, Denver.
- Abraham, K.H. and Pahl, A. (1976), "Bauwerksbeobachtung der grossen Untertageräume des Pumpspeicherwerkes Waldeck II" (in German), *Bautechnik*, Vol. 53, No. 5, pp. 145-155.
- Agbabian Associates (1973), "Analytic Modeling of Rock-Structure Interaction," prepared for Advanced Research Projects Agency, U.S. Bureau of Mines, NTIS AD-761648.
- Allgood, J.R. and Katona, M.G. (1975), "Lateral and Concomitant Responses of Culverts," Proceedings Seminar on Lateral Soil Pressures Generated by Pipes, Piles, Tunnels, Caissons, Dayton Section, ASCE, February.
- Atkinson, J.H. and Potts, D.H. (1977), "Subsidence Above Shallow Tunnels in Soft Ground," *JGED*, ASCE, Vol. 103, No. GT4, pp. 307-325.
- Atrott, G. (1972), "The Application of the NATM to the Construction of the Underground Railway, Frankfurt Main" (Translated from German by Meynadier), *Baumaschine and Bautechnik*, February, pp. 65-71.
- Attewell, P.B. and Farmer, I.W. (1974), "Ground Deformations Resulting from Shield Tunneling in London Clay," *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 11, No. 3, August, pp. 380-395.
- Baecher, G.B. (1972), "Site Exploration, A Probabilistic Approach," Ph. D. Thesis, Dept. of Civil Engineering, MIT.
- Barton, N., Lien, R. and Lunde, J. (1974), "Engineering Classification of Rock Masses for the Design of Tunnel Support," *Rock Mechanics*, No. 6, pp. 189-236.
- Bartlett, J.V., Biggart, A.R., Triggs, R.L. (1973) "The Bentonite Tunneling Machine," *Proceedings Institution of Civil Engineers*, Vol. 54, pp. 605-624.
- Bathe, K.-J. (1976a), "ADINA - A Finite Element Program for Automatic Dynamic Incremental Nonlinear Analysis," Report 82448-1, Acoustics and Vibration Laboratory, Mechanical Engineering Department, MIT, May.

- Burns, J.Q. and Richard, R.M., "Attenuation of Stresses for Buried Cylinders," Proceedings, Symposium on Soil Structure Interaction, Tucson, 1964, pp. 378-392.
- Butler, R.A. and Hampton, D. (1975), "Subsidence Over Soft Ground Tunnel," JGED, ASCE, Vol. 101, No. GT1, pp. 35-49.
- Caron, C. (1967), "Applications et Essais dans le Domaine de l'Electro-Osmose des Terrains Sableux et Argileux," (in French), presented at a conference of the Swiss Society of Soil Mechanics, Zurich, 20 October, 4 pp.
- Casagrande, L. (1952) "Electro-osmotic Stabilization of Soils," Harvard Soil Mechanics Series No. 38, 1952.
- Chambosse, G., "Messungen und Setzungsursachen beim Tunnelvortrieb im Frankfurter Ton" (in German), Mitteilungen der Versuchsanstalt für Bodenmechanik und Grundbau, TH Darmstadt, No. 10, 103 pp.
- Chelapati, C.V. (1964), "Arching in Soil Due to Deflection of a Rigid Horizontal Strip," Conference on Soil-Structure Interaction, Tucson, 1964.
- Clough, R.W. (1976), "European Stabilization Practice Using Chemical Systems in Urban Tunneling" Proceedings 3rd RETC, AIME, New York, Chapter 43, pp. 809-831.
- Clough, G.W. and Davidson, R.W. (1977), "Effects of Construction on Geotechnical Performance," Stanford University, Dept. of Civil Engineering, Report No. CE-214, January.
- Clough, G.W. and Denby, G.M. (1977), "Stabilizing Berm Design for Temporary Walls in Clay," ASCE, Journal Geotechnical Engineering Division, Vol. 103, No. GT2, pp. 75-90.
- Cording E. J., Deere, D.U. (1972), "Rock Tunnel Supports and Field Measurements," Proc. 1st NARETC, Chicago, pp. 601-622.
- Cording et al. (1975), "Methods for Geotechnical Observations and Instrumentation in Tunneling," NSF Grant GI-33644X.
- Cording, E.J., Hansmaire, W.H., MacPherson, H.H., Lenzini, P.A. and Vonderohe, A.P. (1976), "Displacements Around Tunnels in Soil," University of Illinois, August, DOT-TST-76T-22.
- Daemen, J.J.K. and Fairhurst, C. (1972), "Rock Failure and Tunnel Support Loading," Proceedings, International Symposium on Underground Openings, Lucerne, pp. 356-369.
- Daemen, J.J.K. and Fairhurst, C. (1973), "Tunnels and Shafts in Rock: Part 2: Ground Support: Interaction: Fundamentals and Design Implications," Contract No. DACW 45-72C-0018, MRD - U.S. Army Corps of Engineers.
- Deere, D.U., Peck, R.B., Monsees, J.B. and Schmidt, B. (1969), "Design of Tunnel Liners and Support Systems," Report to OHSGT-DOT, PB-183799.

- Golder Associates and McLaren (1976), "Tunneling Technology", published by Ontario Ministry of Transportation and Communication, Toronto, Ontario.
- Golser, J. (1973), "Praktische Beispiele empirischer Dimensionierung von Tunneln" (in German), Rock Mechanics, Supplementum 2, pp. 225-241.
- Golser, J. (1976), Personal Communication, 13 October 1976.
- Goldberg, D.T., Jaworski, W.E. and Gordon, M.D. (1976), "Lateral Support Systems and Underpinning," Vol. I to III and "Concepts for Improved Lateral Support Systems," for FHWA Off. of R & D, Contract No. DOT-FH-11-8499.
- Goodman, R.E. (1966), "On the Distribution of Stresses Around Circular Tunnels in Non-Homogeneous Rocks", Proceedings First Congress of the International Society of Rock Mechanics, Lisbon, Vol. 2, pp. 249-255.
- Goodman, R.E. and Dubois, J. (1972), "Duplication of Dilatancy in Analysis of Jointed Rocks," Journal of the Soil Mechanics and Foundation Engineering Division, ASCE, Vol. 98, No. SM4, April 1972, pp. 399-422.
- Goodman, R.E., Taylor, R.L. and Brekke, T.L. (1968), "A Model for the Mechanics of Jointed Rock," Journal Soil Mechanics and Foundation Engineering Division, ASCE, Vol. 94, No. SM3, pp. 637-659.
- Gould, J.P. (1976), "The Construction Contract: Investigation, Specifications and Monitoring," Boston Society of Civil Engineers - Lecture Series on Lateral Earth Pressure, Fall 1976, Boston.
- Green, A.E. and Taylor, G.I. (1945), "Stress Analysis in Aeolotropic Plates III," Proceedings, Royal Society of London, Series A, pp. 181-195.
- Gysi, H.J., Linder, A. and Leoni, R. (1976), "Prestressed Diaphragm Walls," (in German), Proc. 6th European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vienna, Vol. 1.1, Theme I/2-7, pp. 141-148.
- Gysi, H.J., Linder, A. and Leoni, R. (1977), "Behavior of a Prestressed Diaphragm Wall," Preprint of Paper of Proceedings of the 9th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Tokyo, 8 pp.
- Hackl, E. (1973), Discussion (in German), 20th Geomechanik Kolloquium, Rock Mechanics Supplementum 2, pp. 376-381, Springer, Wien.
- Hackl, E. (1974), "Erfahrungen aus dem Vortrieb des Tauerntunnels" (in German), Rock Mechanics, Vol. 6, No. 2, pp. 81-90.
- Hackl, E. and Müller, G. (1974), "Geomechanische Messungen - Kontrolle und Mittel der empirischwissenschaftlichen Bemessung von Tunnelbauten" (in German), Interfels Messtechnik Information, Bentheim, Germany.
- Hansmire, W.H. and Cording, E.J. (1972), "Performance of a Soft Ground Tunnel on the Washington, D.C. Metro," Proceedings, First Rapid Excavation Tunneling Conference, Chicago, Vol. 1, pp. 371-389.

- Jacob, E.J. (1976), "Urban Tunneling Technology--European Experiences," Proceedings 3rd RETC, AIME, New York, 1976, pp. 794-808.
- Jaeger, J.C. and Cook, N.G.W. (1969), "Fundamentals of Rock Mechanics," Methuen and Co., London.
- Jagsch, D., Müller, J., Hereth, A. (1974), "Bericht über die Messungen und Messergebnisse beim Bau der Stadtbahn Bochum, Baulos A2," (in German), Interfels Messtechnik Information, Bentheim, Germany.
- Jamois, R. (1974), "Programme de Construction de l'Autoroute A8," (in French), Les Procédes Modernes de Construction des Tunnels, 16-17 October, NICE, Edition Sépaly, Décines, pp. 60-63.
- Jaworski, W.E. (1973), "An Evaluation of the Performance of a Braced Excavation," Ph.D. Thesis, Massachusetts Institute of Technology.
- John, M. (1976), "Geotechnical Measurements in the Arlberg-Tunnel and their Consequences on Construction," (in German), Rock Mechanics, Supplementum No. 5, Springer, New York, pp. 157-177.
- Johnson, E.G. (1976), "The Sixty State Street Building, A Case Study," BSCE Lecture Series on Lateral Earth Pressure, Fall 1976, BSCE, Boston,
- Judtmann, . (1976), "Ausschreibungsunterlagen und Anwendung" (in German), Fachtagung NATM by Meynadier AG Zurich, 19 March 1976.
- Karlsrud, K. (1976), Personal Communication.
- Kastner, H. (1962), "Statik des Tunnel - und Stollenbaus" (in German), Springer-Verlag.
- Köhler, H. (1973), "Pumpspeicherwerk Waldeck II - Maschinen-Kaverne und Triebwasserleitung," (in German), Seperate Print from Porr - Nachrichten, No. 55.
- Korbin, G. and Brekke, T. (1975), "A Model Study of Spiling Reinforcement in Underground Openings," Technical Report MRD 2-75, Missouri River Division, U.S. Army Corps of Engineers, 258 pp.
- Krimmer, H. (1976), "Erfahrungen bei der Weiterentwicklung der Spritzbetonbauweise im Frankfurter U - Bahnbau" (in German), ROCK MECHANICS, Supplementum 5, pp. 209-222.
- Kulhawy, F.H. (1975), "Stresses and Displacements around Openings in Homogeneous Rock," pp. 43-57; "Stresses and Displacements around Openings in Rock Containing an Elastic Discontinuity," pp. 59-72; "Stresses and Displacements around Openings in Rock Containing an Inelastic Discontinuity," pp. 73-78, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Vol. 12, No. 1.

- Lombardi, G. (1974), "Tunnel Support", *Advances in Rock Mechanics, Proceedings 3rd Congress International Society for Rock Mechanics, Denver, Vol. 1, Part B.*
- Louis, C. (1974), "Reconnaissance des Massifs Rocheux par Sondages et Classification Géotechnique des Roches, Annales I.T.B.T.P., No. 319, Juillet-Août, pp. 97-122.
- Louis, C. (1974), "Technology and Utilization of Shotcrete," prepared discussion during Tunnel Conference, Journées d'Études de Nice, pp. 121-124, Ed. Sepaly, Decines, France.
- Maillant, M. (1974), "Realisation de l'Autoroute A8 dans le Département des Alpes-Maritimes," (in French), *Les Procédes Modernes de Construction de Tunnels, 16-18 Octobre, NICE, Editions Sépaly, Décines, p. 59.*
- Mayreder, . (1975), "The Arlberg-Highway-Tunnel, Section West" (in German), *Seperate Print from Mayreder-Zeitschrift (1975, No. 11) and (1976, No. 6), 19 pp.*
- Mayrhauser, W. (1976), "Anpassung an besondere Gebirgsverhältnisse" (in German), *Fachtagung Meynadier AG, Zurich, 19 March 1976.*
- McCutcheon (1949), "The Behavior of Rock and Rock Masses in Relation to Military Geology," *Quarterly, Colorado School of Mines.*
- Mindlin, R.D. (1940), "Stress Distribution Around a Tunnel," *Transactions ASCE, Vol. 105, pp. 117-153.*
- Mindlin, R.D. (1948), "Stress Distribution Around a Hole Near the Edge of a Plate in Tension," *Proceedings of the Society for Experimental Stress Analysis.*
- Moavenzadeh, F. et al., (1974), "Tunnel Cost Model," *Reports No. 1-7, MIT, Dept. of Civil Engineering,*
- Müller, G. (1973), "Geomechanische Messungen der Interfels in den Tunneln der Tauernautobahn" (in German), *Interfels Messtechnik Information, Bentheim, Germany.*
- Müller, L., Spaun, G. and Hereth, A. (1976), "Möglichkeiten und Grenzen von Kostensenkungen im Tunnelbau" (in German), *Proceedings 2. Nationale Tagung über Felsmechanik, Deutsche Gesellschaft für Erd- und Grundbau, 1.-2. April 1976, Aachen, Germany.*
- Müller, L. (1976), *Personal Communication, draft of textbook on Rock Construction (in German).*
- Müller, L., Sauer, C., and Chambosse, G. (1977), "Berechnungen, Modellversuche und in-situ Messungen bei einem bergmännischen Vortrieb in tonigem Untergrund, *Bauingenieur Vol. 52, No. 1, pp. 1-8.*
- Müller, L. (1977), "The Use of Deformation Measurements in Dimensioning the Lining of Subway Tunnels," *Preprint International Symposium on Field Measurements in Rock Mechanics, ETH, Zurich, April 4-6, 21 pp.*

- Peck, R.B. (1969a), "Advantages and Limitations of the Observational Method in Applied Soil Mechanics," 9th Rankine Lecture, Geotechnique, Vol. 19, No. 2, pp. 171-187.
- Peck, R.B. (1969b), "Deep Excavations and Tunneling in Soft Ground," Seventh International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Mexico City, State of the Art Volume, pp. 225-290.
- Peck, R.B., Hendron, A.J. Jr. and Mohraz B. (1972), "State of the Art of Soft Ground Tunneling," Proceedings, First Rapid Excavation Tunneling Conference, Chicago, AIME, Vol. 1, pp. 259-286.
- Peck, R.B. (1976a), Personal Communication.
- Peck, R.B. (1976b), "Performance of Lateral Support Systems," BSCE Lecture Series on Lateral Earth Pressure, 25 pp.
- Pöckhacker, H. (1974), "Tunneling in Squeezing Rock, Theory and Practice," Separate Print from Porr-Nachrichten No. 57 and No. 59, 28 pp.; english translation in Proceedings of 3rd RETC, Chapter 27, pp. 464-512.
- Pöckhacker, H. (1976), "Wirtschaftliche Aspekte des Hohlraumbaues in druckhaftem Gebirge" (in German), Rock Mechanics, Supplementum 5, pp. 101-114.
- Poulos, H.G. and Davis, E.H. (1974), "Elastic Solutions for Soil and Rock Mechanics," John Wiley and Sons, New York, 411 pp.
- Proctor, R.V. and White, T.L. (1946), "Rock Tunneling with Steel Supports," The Commercial Shearing and Stamping Co., Youngstown, Ohio.
- Rabcewicz, L.v. (1957) "Bolting Replaces Conventional Tunnel Support" (in German), Schweizerische Bauzeitung, Vol. 79, No. 9, pp. 123-131.
- Rabcewicz, L.v., (1965) "The Stability of Tunnels Under Rock Load", Water Power, Part 1, June 1969, pp. 225-229; Part 2 July 1969, pp. 266-273; Part 3 July 1969, pp. 297-302.
- Rabcewicz, L.v. and Sattler, K. (1965), "The New Austrian Tunneling Method" (in German), Der Bauingenieur, Vol. 40, No. 8, pp. 289-301.
- Rabcewicz, L. (1970), "The Semi-stiff Shell as a Means for the Empirical Scientific Dimensioning of Underground Excavations" Rock Mechanics, Supplementum 1, Springer, Wien and New York, pp. 58-68.
- Rabcewicz, L., Golser, T. and Hackl, E., (1972) "Die Bedeutung der Messung im Hohlraumbau" Bauingenieur, Vol. 47, No. 7, pp. 225-234 and No. 8 pp. 278-287.
- Rabcewicz, L., (1973) "Die Entwicklung der Messtechnik im Rahmen der Neuen Osterreichischen Tunnelbauweise" (in German) Interfels Messtechnik Information (1973), Bentheim Germany.
- Rabcewicz, L., (1973) "Theorie and Praxis bei den Untertagearbeiten Dammbauvorhabens" (in German), Rock Mechanics Supplementum No. 2, 1973, pp. 193-224.

- Sauer, G. (1976) "Spannungsumlagerungen und Oberflächensenkung beim Vortrieb von Tunneln mit geringer Überdeckung", (in German) Veröffentlichungen des Institutes für Boden- und Felsmechanik, Universität Karlsruhe, Heft 67.
- Savin, G.N. (1970) "Stress Distribution Around Holes," NASA Technical Translation, NASA TT F-607, November 1970.
- Schäfer, U. (1975) "Tiefback Wull Below the Watertable as Part of a Building With Permanent Drainage" (in German), Schweizerische Bauzeitung, Vol. 93, No. 7 pp. 69-76.
- Seeber, G. (1976) "Zur Tunnelberechnung in druckhaftem Gebirge" (in German) Preprint of a presentation at the 25th geomechanics colloquium 14/15 October 1976, Salzburg.
- Seeber G. (1977) , Personal Communication.
- Semple, R.M., Hendron A.T., and Mesri, G., (1973) "The Effects of Time-Dependent Properties of Altered Rock on Tunnel Support Requirements", Report No. FRA-ORD - 74-30, Federal Railroad Administration, US. Dept. of Transportation.
- Smith, M. (1974), "Test-sections on the British Side of the Channel Tunnel," (in French), Proceedings of the tunneling conference at Nice, France, 16-18 Oct. 1974 AFTES, ed. Sépaly, Décines, France, pp. 148-149.
- Sonderegger, A. (1956), "Shotcrete in Tunneling," (in German), Schweizerische Bauzeitung, Vol. 74, No. 14, pp. 210-212.
- Springer, D.E., Healy, T., Gnaedinger, J.P. (1977), "Mediation-Arbitration: A New Approach to Conflict Resolution in the Construction Industry," Journal Boston Soc. of Civil Eng., Sec.-ASCE, Vol. 64, No. 2 pp. 99-105.
- Steinhauer, E.R. (1976) "Effects of Ground Behavior on Tunnel Supports", unpublished Master of Science Thesis, MIT, May 1976.
- Stini T., (1950) "Tunnelbaugeologie" Wien, Springer - Verlag.
- Stroh, D. and Chambosse, G. (1973) "Measurements and Causes of Settlements During Tunneling in the Frankfurt Clay. (in German) Strasse, Brücke, Tunnel, 1973, No. 2, pp. 38-42.
- Szechy, K., "The Art of Tunneling", Akademiai Kiado, Budapest, 1967.
- Terzaghi, K. (1943) "Theoretical Soil Mechanics", John Wiley & Sons, New York.
- Terzaghi, K. (1946) "An Introduction to Tunnel Geology" in Rock Tunneling with Steel Supports, by Proctor, R.V. and White, T.L., The Commercial Shearing and Stamping Co., Youngstown, Ohio, USA.
- Terzaghi, K. and Richart, F.E. (1952) "Stresses in Rock About Cavities," Geotechnique Vol. 2, No. 1. pp. 57-90.
- Timoshenko, S.P. and Goodier, J.N. (1934) "Theory of Elasticity" McGraw-Hill, New York, 567 pp.