

Máster Universitario
en Túneles
y Obras Subterráneas



ÁREA: B
MÓDULO: DISEÑO Y PROYECTO DE

GRANDES CAVERNAS DISEÑO ESTRUCTURAL

Ponente: Luis del Cañizo
Dr. Ing. Caminos
UPM

Día: 21/03/07
Hora: 16:00 a 17:00

Master Universitario en Túneles y Obras Subterráneas
UPM AETOS Colegio ICCP 2007
Área B Diseño y Proyecto de Túneles

GRANDES CAVERNAS. DISEÑO ESTRUCTURAL

Luis del Cañizo Perate, UPM, Esteyco

21-3-2007

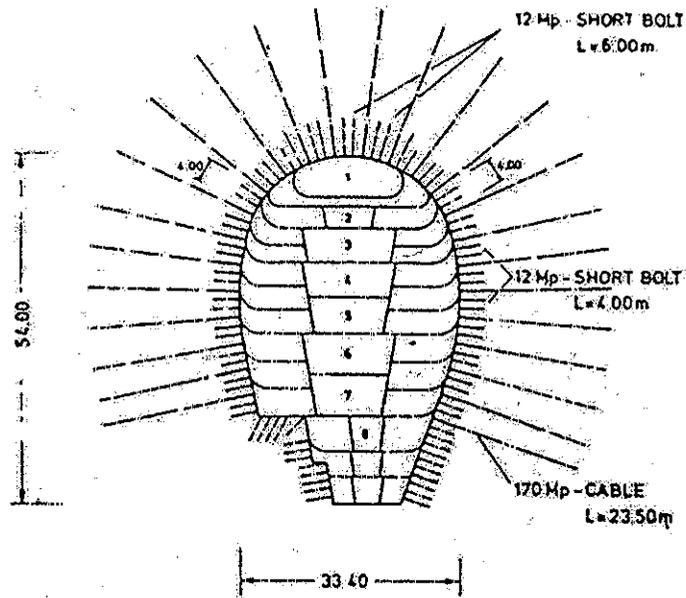
1- INTRODUCCIÓN

El progreso de la técnica de túneles tiene hitos importantes, como el paso bajo el Támesis con un escudo en 1825-42, o los largos túneles con gran montera a mediados del siglo XIX gracias a la dinamita y al martillo perforador mecánico, los más de 3 km que perforó un topo en 1881 bajo la orilla británica del canal de la Mancha con un siglo de adelanto, y ya en 1956 el nacimiento del Nuevo Método Austriaco. Pero son los pequeños avances y mejoras que se logran cada lustro los que han permitido alcanzar el desarrollo actual, con la rapidez del avance, la reducción de costes y la seguridad del personal de obra. Pero también han contribuido a ayudar a esa optimización y abaratamiento de las técnicas constructivas la costosa osadía del túnel de Seikan de 54 km, con 210 m bajo el Pacífico, o las excavaciones gigantes en terreno favorable, a las que se dedica este texto.

El objeto de este capítulo son las grandes excavaciones subterráneas de uso civil o militar, que exigirá una buena estabilidad durante un largo plazo, en una zona localizada y generalmente escogida a voluntad, por lo cual suele tratarse de terreno homogéneo, de buenas características resistentes y del que se puede alcanzar un buen conocimiento, si bien éste debe adquirirse mediante un reconocimiento complejo y detallado, ya que el plazo de construcción de la obra no permitirá, como en la mina, el readaptar y modificar el método de excavación. La calidad de la roca suele permitir, pese al gran tamaño del hueco, que el revestimiento sea mínimo e incluso casi inexistente Por el contrario en un túnel lineal de transporte se suelen atravesar terrenos cambiantes, que casi nunca se pueden escoger o evitar, y de los que se obtiene un conocimiento mas limitado.

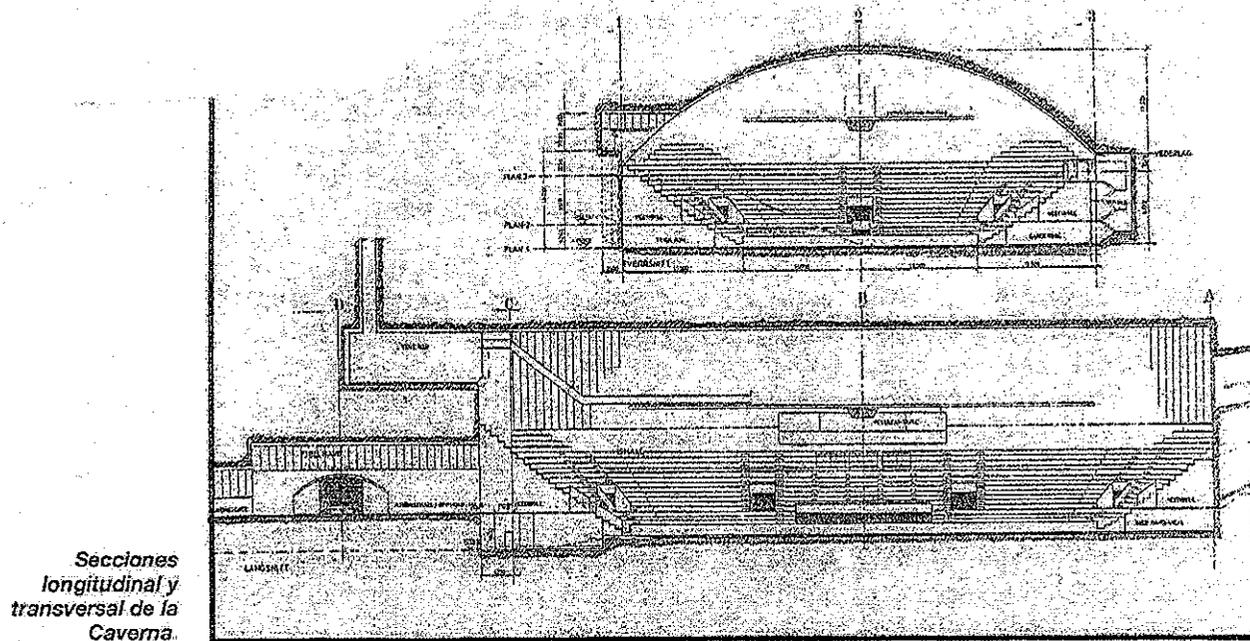
Debe aclararse que el término «grande» es relativo. Se refiere, en general, a secciones de más de 25 m de luz y más de 30 m de altura, aunque también incluye el concepto de grandes volúmenes obtenidos con una sección mediana, pero gracias a una multitud de huecos próximos y de cierta longitud para almacenamientos de líquidos combustibles. Diversos ejemplos son una de las mayores centrales hidroeléctricas subterráneas, Waldeck II (Austria), es de 33,4 m por 54 m (Fig.1); en una mina de oro sudafricana hay una caverna de 16,6 m de luz a 2.750 m de profundidad, y en minería existen cavidades de más de 60 m de luz. Otro ejemplo de aplicación muy diferente es el estadio deportivo subterráneo de Oslo, con 61 m de luz (Fig.2 y 3).

En estos casos se adopta la decisión de hacer una gran excavación subterránea porque en un emplazamiento concreto existe una necesidad determinada que puede resolverse con una alternativa económicamente competitiva gracias a la buena calidad del terreno.



Underground power station Waldeck II;
 sequence of excavation and support.

Figura 1



Secciones
 longitudinal y
 transversal de la
 Caverna.

Figura 2

Sin embargo, las grutas naturales marcan un límite bastante mayor. La Cueva del Carlista, en Vizcaya, que es la segunda conocida por su tamaño, tiene 504 m por 250 m y 90 m de altura, la de Verna, en los Pirineos, que es la tercera, tiene 170 m por 200 m por 140 m y la de Carlsbad (Nuevo Méjico) alcanza 190 m de luz y las torcas, posibles cuevas cuyo delgado techo se hundió, sobrepasan en España con frecuencia los 300 m de diámetro. En cuanto a longitud, las diversas galerías del Mamut, en EE.UU. suman más de 200 Km. y Ojo de Guareña (Burgos), que es la séptima conocida, excede los 71 Km.

2- APLICACIONES

Las grandes excavaciones subterráneas pueden tener usos muy distintos:

Almacenamiento de diversos productos: Líquidos combustibles (petróleo, gasolina, aceite pesado, gas-oil, etc.). Agua caliente. Gases combustibles licuados. Alimentos fríos y congelados. Residuos atómicos.

Habitación: Residencias. Oficinas. Refugios.

Instalaciones industriales: Centrales hidroeléctricas. Depósitos de agua para centrales de bombeo en países llanos. Depósitos de aire comprimido, para la perforación de minas, chimeneas de equilibrio, o para almacenamiento de energía en centrales de bombeo. Fabricaciones que necesiten una seguridad especial.

Militares: Almacenamiento de armamento y explosivos. Bases de submarinos, como la de Cartagena.

Hay una serie de causas que impulsan a un uso generalizado de las grandes excavaciones subterráneas:

- Falta de espacio en las urbes.
- Mayor seguridad cuando se almacenan productos inflamables, explosivos o radiactivos.
- Mayor seguridad, frente a agentes exteriores, como bombardeos, sabotajes, el impacto de avión, etc. Protección ecológica frente a accidentes.
- Mayor economía, gracias a aprovechar la resistencia natural del terreno (almacenamientos de gas a presión y de líquidos) al aislamiento térmico obtenido (almacenamiento de cuerpos fríos o calientes), a ahorros en el sistema de seguridad necesario, y por el perfeccionamiento de las técnicas de excavación y el efecto de mayor escala. Se pueden aprovechar excavaciones ya existentes, como es el caso de minas antiguas abandonadas, o de cavernas de sal, cuya adaptación es relativamente poco costosa. El almacenamiento del petróleo puede reducir el coste a la mitad en profundidad en rocas adecuadas, respecto a múltiples tanques metálicos en superficie, para grandes volúmenes (Fig.4, 5 y 6).

Almacenamientos

La aplicación más típica es el almacenamiento de líquidos combustibles (Fig.7), iniciado en los países escandinavos, que suele constar de una serie de cavidades conectadas mediante las correspondientes tuberías y pozos y con los dispositivos de bombeo y control necesarios.

Secuencia de excavación.
Sección

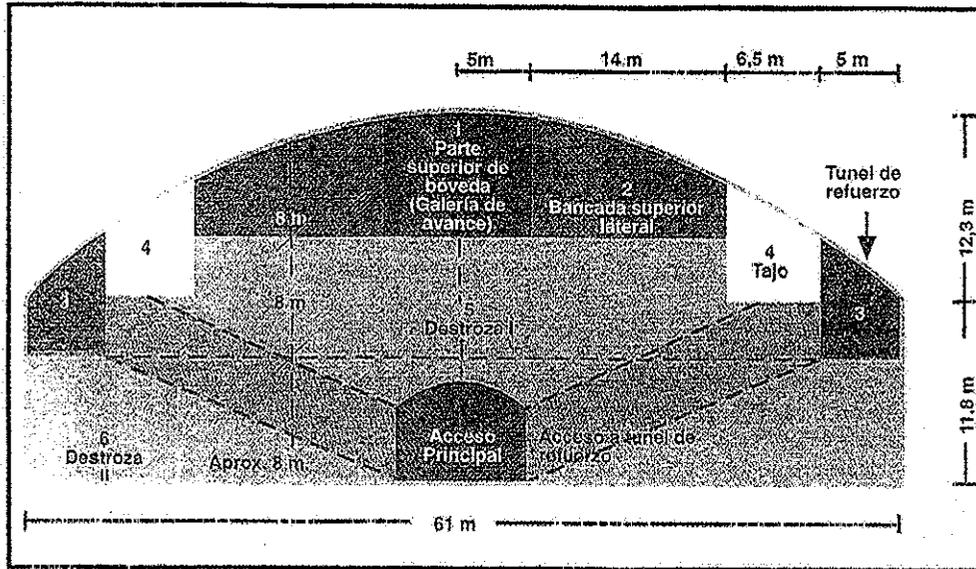
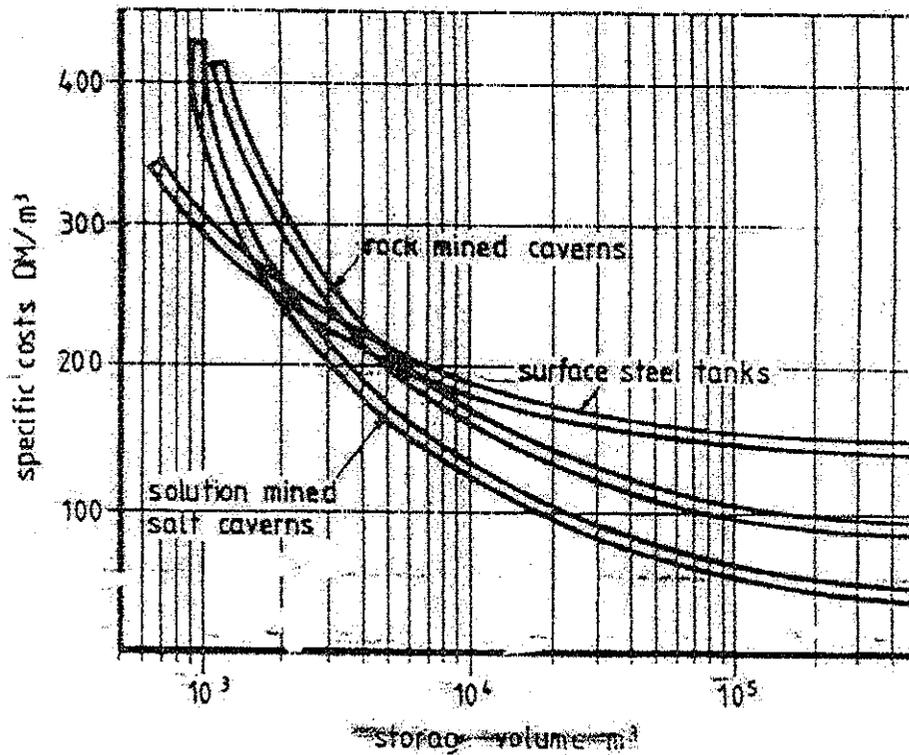
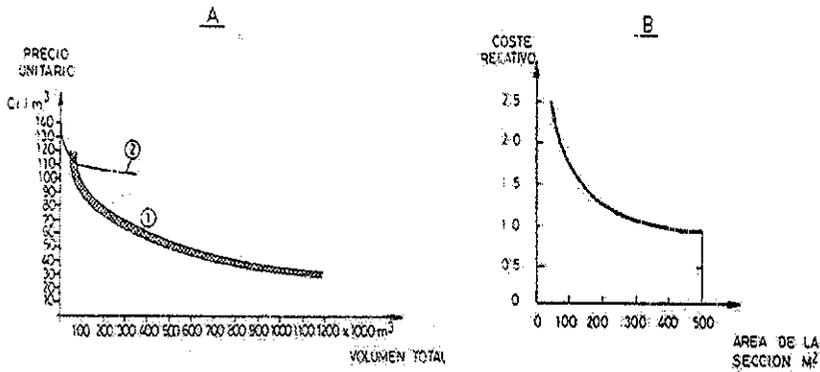


Figura 3



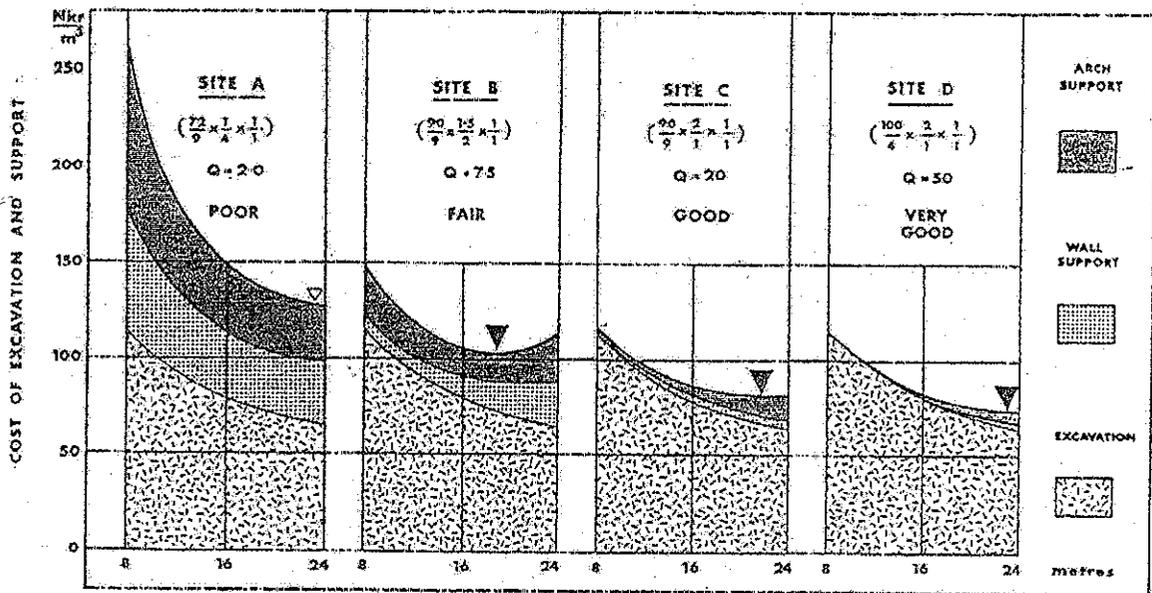
Specific costs of underground caverns in comparison to surface tanks.

Figura 4



Comparación de costes unitarios A) En función del volumen total para almacenamientos de petróleo subterráneos en roca de buena calidad (curva 1) y para depósitos en superficie (curva 2) Expresado en coronas secas por m³ (según Nilsson, 1979) B) En función del área de la sección de la caverna (según Harper Hinds, 1977)

Figura 5



Relative costs for excavation and support for 1-million m³ of storage using caverns 16, or 24 m span at four different sites. Cavern heights : 8, 18, or 28 m, ESR=1.3, SNkr BARTON et al.

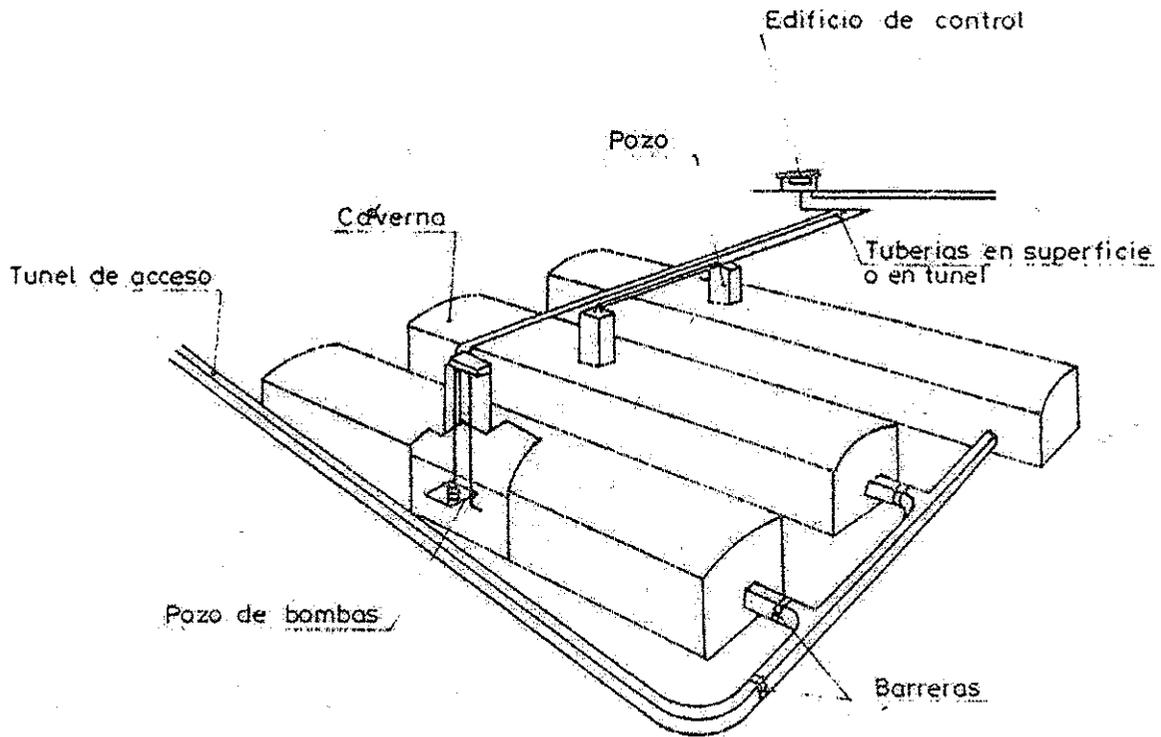
A : Shale with three smooth-planar joint sets, partly chlorite-coated (Q = 2.0)

B : Granite with three joint sets, slightly weathered (Q = 7.5)

C : Anorthosite, unweathered, with smooth undulating foliation joints (Q = 20)

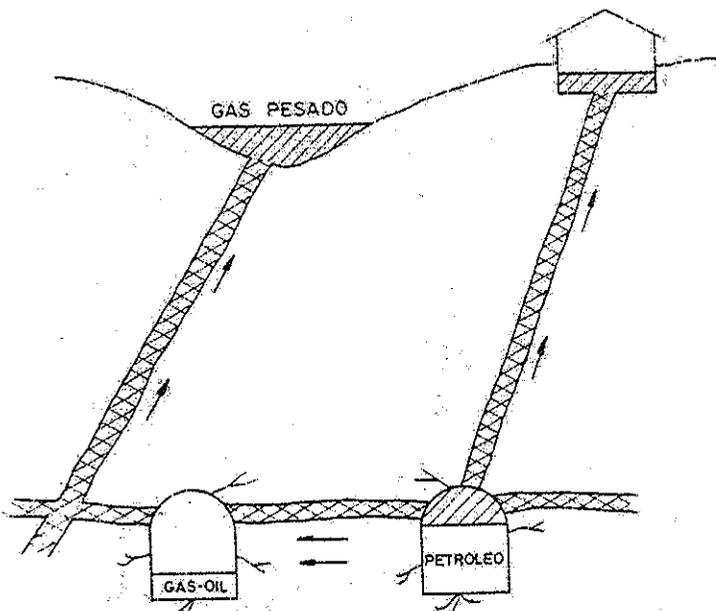
D : Granitic gneiss, unweathered, massive, only two widely spaced joint sets (Q = 50)

Figura 6



Esquema de un almacenamiento subterráneo de petróleo

Figura 7



Filtración a través de las diaclasas de la roca del líquido almacenado en una caverna a otra próxima, o del vapor hacia la superficie

Figura 8

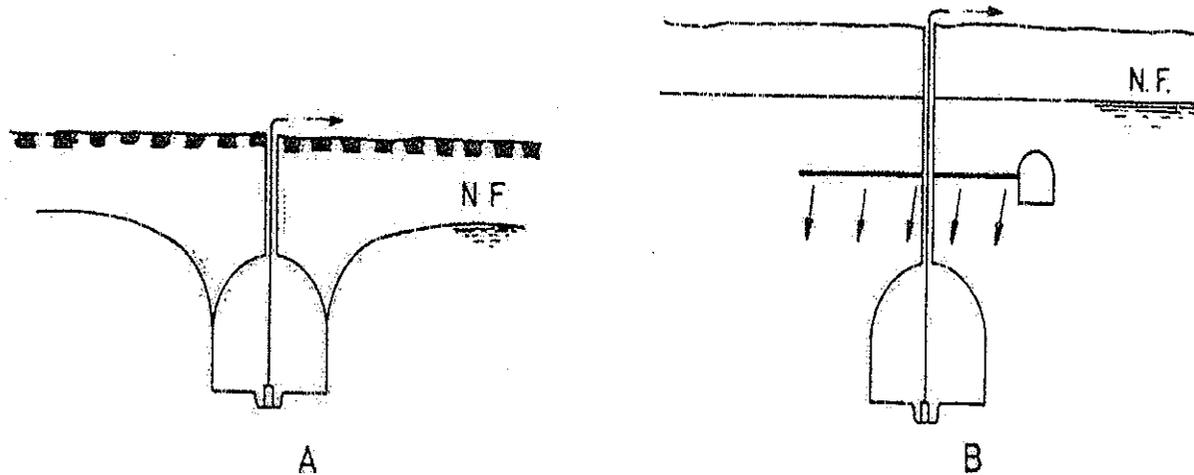
El almacenamiento de un producto que sea líquido a la presión atmosférica se puede realizar permitiendo que el nivel freático inicial o rebajado quede a la altura de la cavidad (Fig. 8 A).

El almacenamiento a sobrepresión es aplicable, en general, a líquidos y a gases, debiendo quedar la cavidad a profundidad suficiente bajo el nivel freático, de modo que la presión del agua del terreno sea superior a la presión de vapor del líquido a la temperatura máxima a que llegue en su almacenamiento, y así ayude a la contención del fluido, y en una cavidad sin revestimiento evite que el vapor desplace al agua de las diaclasas y se filtre hasta superficie (Fig. 8 B). En este caso debe asegurarse un cierto resguardo en el nivel del agua, aun contando con épocas secas de menor recarga por lluvias, y con un cono de depresión del nivel freático causado por las filtraciones hacia la caverna, de modo que si fuera necesario habría que forzar una recarga artificial mediante una cortina de inyecciones de agua desde superficie o desde galerías auxiliares.

La tendencia general para el petróleo y sus productos derivados es el almacenamiento a sobrepresión. Como estos líquidos combustibles tienen una densidad inferior a la del agua, las filtraciones que llegan a la caverna se quedan debajo del producto. Existen dos formas de actuar respecto a dicha agua. En las instalaciones denominadas de "lecho variable" se mantiene un espesor de agua pequeño y definido (Fig. 9 A), bombeando las filtraciones a medida que se producen. Como consecuencia cuando el depósito está medio vacío, la parte superior de la cavidad queda llena de vapores, que en determinados productos, como la gasolina, pueden ser peligrosos. Además, se puede llegar a alterar el nivel freático, y es más fácil la filtración del vapor hacia la superficie si las diaclasas de la roca por encima de la caverna no están bien llenas de agua cuando durante la construcción se produce cierto drenaje de la roca circundante, y parte de las fisuras quedan llenas de aire. Otro tipo de filtración indeseable es el que puede existir entre las cavernas contiguas que almacenan distintos productos (Fig. 10); en estos casos debe ensancharse la pared de separación entre ellos y cuidar las voladuras durante la excavación para no dañar la roca, aparte de mejorar ésta mediante inyecciones.

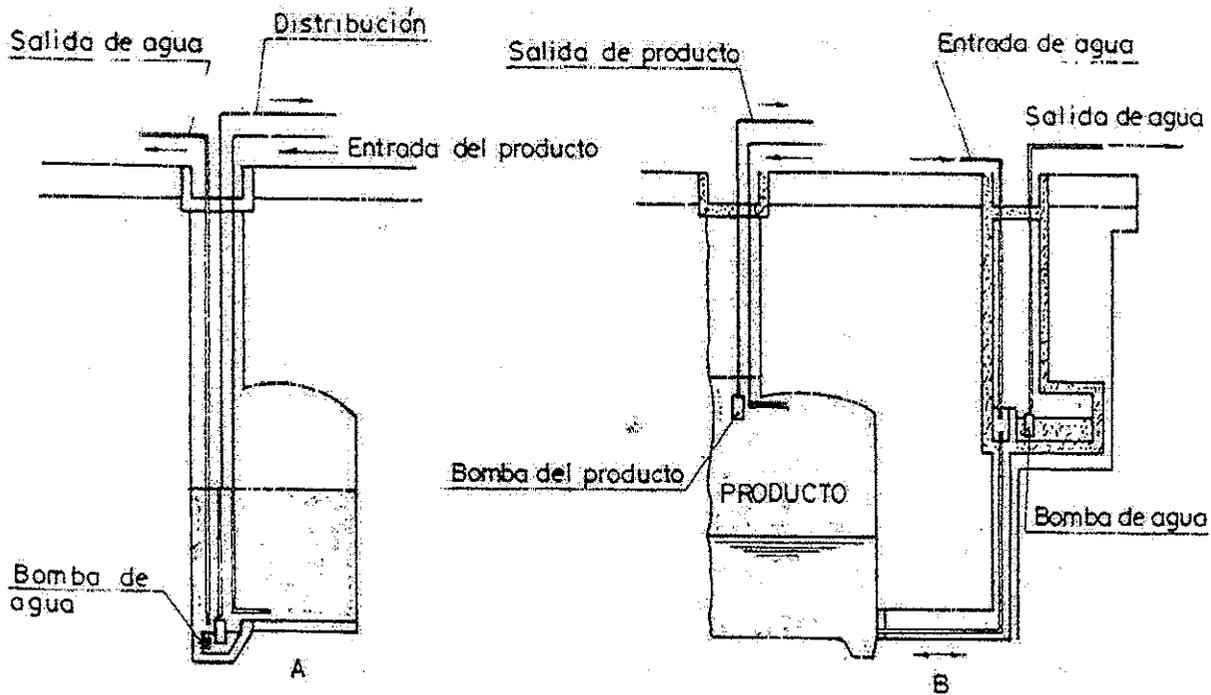
El otro tipo de instalaciones es la de «lecho fijo», manteniendo fijo en ellos el nivel superior del combustible, de modo que cuando se extraiga éste se bombea agua al interior de la caverna (Fig. 9 B). Posee las ventajas de que el nivel freático se mantiene constante y el caudal medio de filtraciones de agua lógicamente disminuye, pero, sin embargo, el volumen de agua a bombear es mucho mayor y sólo se compensa en parte por la menor altura de elevación del combustible, que es siempre constante. Las cavernas auxiliares de maquinaria de bombeo u otro tipo conviene alejarlas de las de almacenamiento y ponerlas a cota superior e incluso revestirlas.

Determinados productos requieren calentarse entre 30° e y 60° e para disminuir su viscosidad y facilitar su trasiego, como son el aceite pesado o los crudos. Puede mantenerse caliente sólo la parte superior del líquido de la cavidad o puede calentarse la totalidad del volumen. Ya se ha comentado la ventaja del aislamiento térmico natural que posee una excavación subterránea, pero aparece la contrapartida de las tensiones térmicas que se crean en el anillo de roca caliente



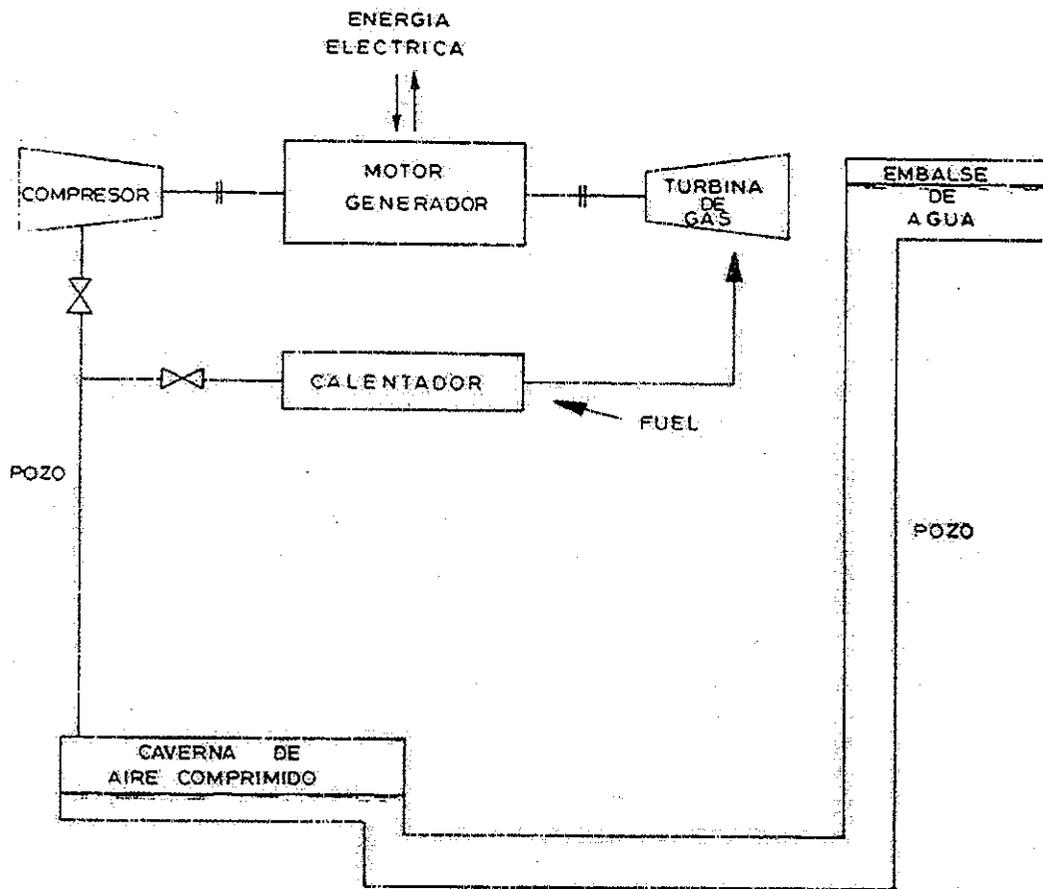
Almacenamiento de líquidos. A) A la presión atmosférica. B) A sobrepresión y con cortina de inyección de agua

Figura 9



Almacenamiento de líquidos combustibles. A) Con nivel variable B) Con nivel fijo

Figura 10



Esquema de una central eléctrica de bombeo.

Figura 11

Debido a que en estas cavidades para almacenamiento de fluidos no hay personal y apenas instalaciones, las cuales en todo caso se pueden colocar con cierta protección, se acepta que se produzcan algunos desprendimientos de roca para poder ahorrar el revestimiento. Puede instalarse un sistema de control de estas caídas de bloques mediante sensores que registran los impactos y estiman su posición y la masa aproximada del bloque a través de la energía del golpe.

Otros problemas de estos almacenamientos son la corrosión de tuberías y equipos, sobre todo cuando es en caliente y hay agua de mar, o la emulsión de los aceites en el agua, o los depósitos de lodos en los puntos bajos de la solera. El mantenimiento de los equipos, y el control piezométrico son dos temas muy importantes.

Las centrales de bombeo para producción de energía eléctrica de punta, de ciclo diario o semanal, es otra aplicación, interesante. Puede aprovecharse un lago o presa existente y utilizar un almacenamiento subterráneo como segundo depósito a gran profundidad, en lugar de la solución usual de buscar un depósito elevado en una montaña próxima, ya que los emplazamientos posibles para esta última solución están bastante limitados. En este caso no es preciso que exista un acuífero en la roca, ya que el agua inferior queda a la presión atmosférica, pero en cambio es importante que las filtraciones sean pequeñas para no tener un consumo innecesario de bombeo.

También existen almacenes de energía en forma de aire comprimido. Esto puede realizarse de dos formas: a volumen constante y a presión constante. Las centrales de bombeo donde se almacena el aire a volumen constante y presión variable disponen la cavidad a poca profundidad, para lo cual requieren una roca muy resistente e impermeable, o precisan dotar a la cavidad de un revestimiento.

Las centrales donde el almacenamiento se realiza a volumen variable y presión constante requieren situar la cavidad a gran profundidad. Un embalse de superficie no muy grande permite dar la presión constante a través de un pozo de comunicación al aire encerrado en la cavidad, la cual se llena alternativamente de agua o de aire (Fig. 11). La roca debe contener un acuífero a la presión del nivel freático para evitar las fugas del aire.

La generación de energía eléctrica se consigue calentando en una cámara de combustión el aire comprimido mediante fuel o gas natural, y alimentando seguidamente una serie de turbinas de gas donde se va expandiendo hasta alcanzar una presión de pocas atmósferas. La recarga se realiza comprimiendo el aire en dos etapas e introduciéndole a presión en el depósito subterráneo, utilizando el generador como electromotor a horas de poco consumo con energía de las centrales de base, que sustituyen aproximadamente los dos tercios del combustible precisos en una central de turbinas de gas. Este tipo de central; tiene la ventaja de que puede disponer todos sus equipos mecánicos en la superficie. Se presentan el problema del cambio térmico cíclico en la caverna. La primera central de este tipo, en Huntorf (Alemania, 1979) utiliza un conjunto de cavernas en un domo salino con más de 300.000 m³ de volumen, una potencia de 290 Mw. y con aire a unos 7 MPa.

3. PROCEDIMIENTOS CONSTRUCTIVOS

Dado el gran tamaño de la sección y su altura es obligada la excavación por fases o áreas parciales para utilizar la maquinaria comercial de excavaciones. Por otro lado si el revestimiento es somero, a base de gunita y bulones, se puede aplicar parcialmente durante cada fase de excavación, en especial reforzando la roca en el techo tras la primera fase.

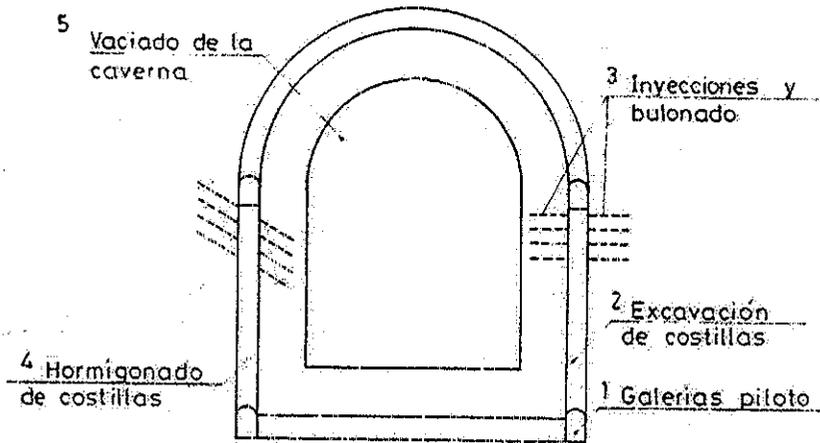
Ello suele corresponder al conocido *Método belga*. Se comienza por un avance en clave, de la anchura total o seguida de un ensanche, completando la excavación de toda la corona o parte alta de la sección, y a continuación se realiza, si lo hay, el revestimiento definitivo de toda la bóveda, infrecuente en almacenamientos pero usual en grandes centrales hidráulicas subterráneas. Cuando el frente de trabajo se ha alejado se hace la destroza, es decir la excavación de la parte inferior, que en general suele incluir la mayor parte de volumen de terreno posible, en tantas fases descendentes como haga falta, según sea la altura total y el tamaño de la maquinaria. En estas fases el sostenimiento suele ser mínimo, a base de bulones y un sellado de gunita en las zonas pertinentes.

Un método ideado para excavaciones mas grandes de las actuales es el de las costillas previas o de prerrefuerzo (Fig.12 y 13). Si el sostenimiento no es suficiente y un revestimiento por sus dimensiones es antieconómico, se recurre a un revestimiento discontinuo, a base de arcos o contrafuertes de hormigón. Estas costillas se excavan y macizan con hormigón armado previamente y pueden incluso estar separadas de la cavidad final. Desde ellas, antes de macizarlas, puede bulonarse, anclarse e inyectarse un cierto espesor de roca, tanto hacia afuera como hacia la cavidad final, de modo que el método consiste realmente en un refuerzo de la roca. Estos tratamientos pueden reforzarse y orientarse adecuadamente en las zonas más débiles y diaclasadas, que se pueden conocer bien precisamente por la excavación previa de las costillas, con la ventaja de que la roca se trata antes de que haya podido sufrir la alteración propia de las voladuras y el vaciado de la gran excavación. Tras finalizar el refuerzo de la roca y el hormigonado de las costillas se procede a la excavación de la caverna, iniciándola en cabeza y con bancos descendentes. Con este procedimiento, apenas utilizado, se puede llegar con facilidad a secciones de 2.000 m².

La excavación de las costillas es complicada, pues incluye galerías horizontales para acceso y evacuación de detritus y los pozos y galerías que siguen las directrices del arco.

Para el caso de que se recurra a una *prebóveda* continua, y no a costillas aisladas se puede empleo una pequeña máquina rozadora guiada desde túneles piloto, que desarrolla por pasadas continuas el vaciado estricto de la bóveda (Fig.14).

Esta misma idea se ha extendido incluso a túneles en suelos flojos, aunque con luces mucho menores (Fig.15) Las tuneladoras integrales para suelos de calidad media hoy llegan ya a 12 m de diámetro, por primera vez bajo la bahía de Tokio, y hoy a más de 15 m, prometiendo seguir creciendo, aunque las marcas suelen ser antieconómicas.



Excavación previa de costillas, tratamiento de refuerzo de la roca mediante anclajes e inyecciones, macizado con hormigón de las costillas y vaciado final de la gran cavidad interior

Figura 12

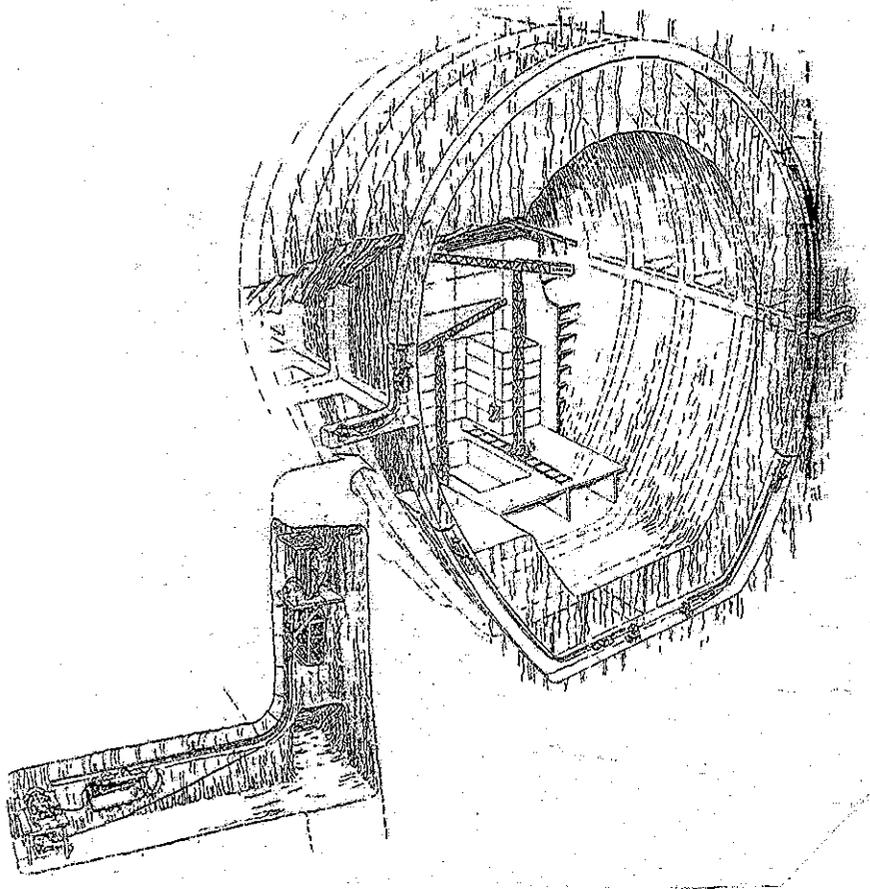
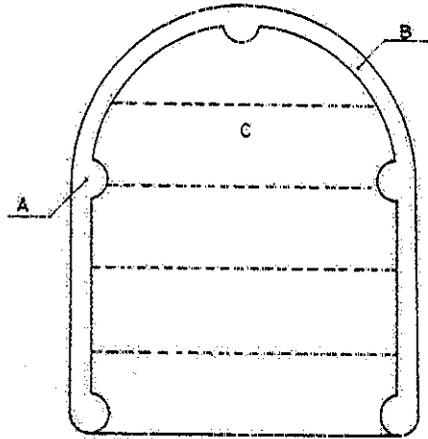
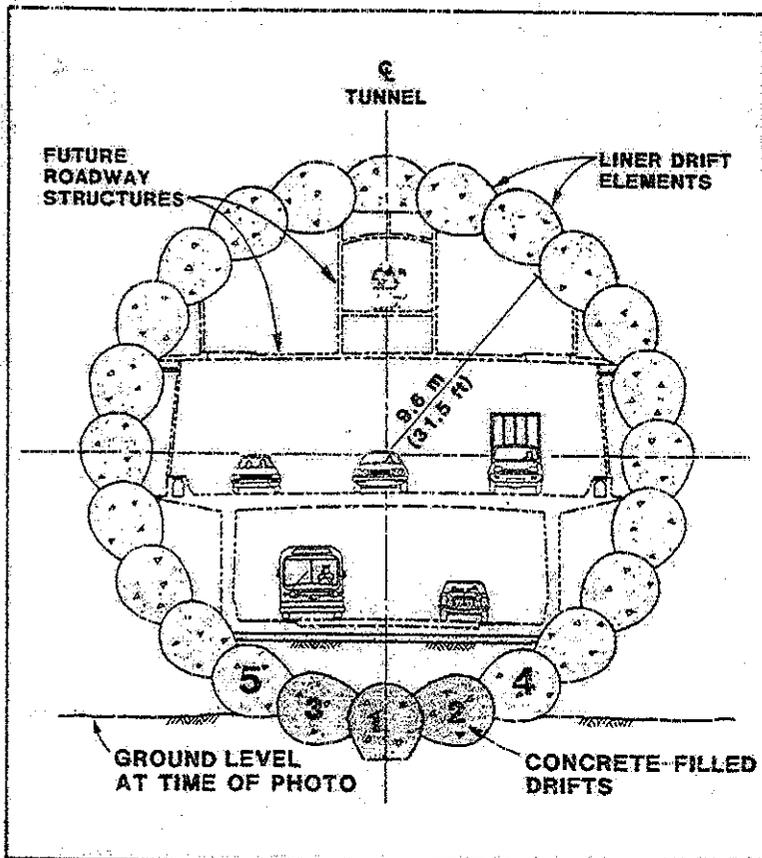


Figura 13



Excavación estricta de la bóveda y hormigonado de la misma previamente al vaciado final. A) Túneles piloto con posible empleo de topos B) Bóveda excavada por pasadas sucesivas de un disco rozador guiado desde los túneles piloto. C) Excavación por bancos descendentes de la cavidad final.

Figura 14



Design details of the world's largest diameter soil tunnel. 1984

Figura 15

El empleo de tuneladoras integrales de gran diámetro en rocas de resistencia alta, generalizadas ya en transportes si el tráfico es intenso, no resulta en cambio rentable en almacenamientos de gran volumen.

La construcción de las grandes excavaciones subterráneas no se suele realizar con el nuevo método austriaco puro, pero aplica diversos conceptos del mismo.

La idea principal consiste en que sea la propia roca de alrededor del túnel la que se autosoporte al máximo posible, teniendo la entibación y el revestimiento definitivo una misión de confinamiento o de piel, y siendo lo más ligeros posibles que sea compatible con el empuje reducido que actúe sobre ellos. Para lograr ese autosoporte debe formarse un arco de descarga en la roca, lo cual requiere que las deformaciones radiales alcancen una cierta magnitud gracias a la flexibilidad y lo reducido de la entibación; de este modo se consigue a su vez una disminución considerable de las presiones sobre el revestimiento con la economía consiguiente.

Para lograr el autosoporte de la roca es necesario evitar su aflojamiento y degradación, debiendo colocarse el soporte provisional rápidamente, muy próximo al frente de excavación, y ceñido a la roca para evitar la desintegración del macizo, lo que suele iniciarse con la apertura de fisuras y caída de bloques muy pequeños.

La gunita y el hormigón proyectado, los bulones tesados y las cerchas metálicas son los tipos de sostenimientos que mejor se integran en dicha filosofía, por su alta resistencia inicial, facilidad de colocación inmediata al avance, por la mejora que consigue en el terreno al sellar su superficie dificultando la meteorización, al aumentar la resistencia a cortante del terreno y por permitir cierta deformabilidad, necesaria para que se cree la «zona protectora» y se desarrolle el arco de descarga. La utilización de la técnica de precorte cuando se emplean voladuras es obligada, por la suavidad de forma de la sección que se obtiene y para dañar la roca lo menos posible, evitando la apertura de grietas con las consiguientes descompresiones y caídas de bloques y el aumento de la permeabilidad y las filtraciones.

La forma ideal desde el punto de vista de tensiones en el terreno es con una contra bóveda, y como ello puede ser poco práctico, al menos se redondean las esquinas de la solera para evitar concentraciones de tensiones que se inicie la plastificación de esa zona del terreno.

El método debe ser muy flexible, adaptándose a cada sección de terreno, reforzando las zonas débiles y en general optimizando el soporte y logrando una mejora de la seguridad y de la economía, apoyándose en el control de las deformaciones, en especial del descenso de la clave y la convergencia entre hastiales. La tecnificación que exige el nuevo método austriaco debida a los controles durante la construcción es muy grande, y constituye un avance crucial en la historia de los túneles.

Si, como ya se ha comentado, las grandes excavaciones no suelen tener el revestimiento de hormigón normal en los túneles, ni emplean cerchas metálicas de gran luz, si utilizan en cambio la gunita o el hormigón proyectado, las inyecciones, y sobre todo los bulones y anclajes activos, técnicas todas ellas que se han generalizado y perfeccionado en gran parte por el nuevo método austriaco. También suelen incluir una gran tecnificación en cuanto al reconocimiento más detallado del terreno y la frecuente realización de tramos de ensayo.

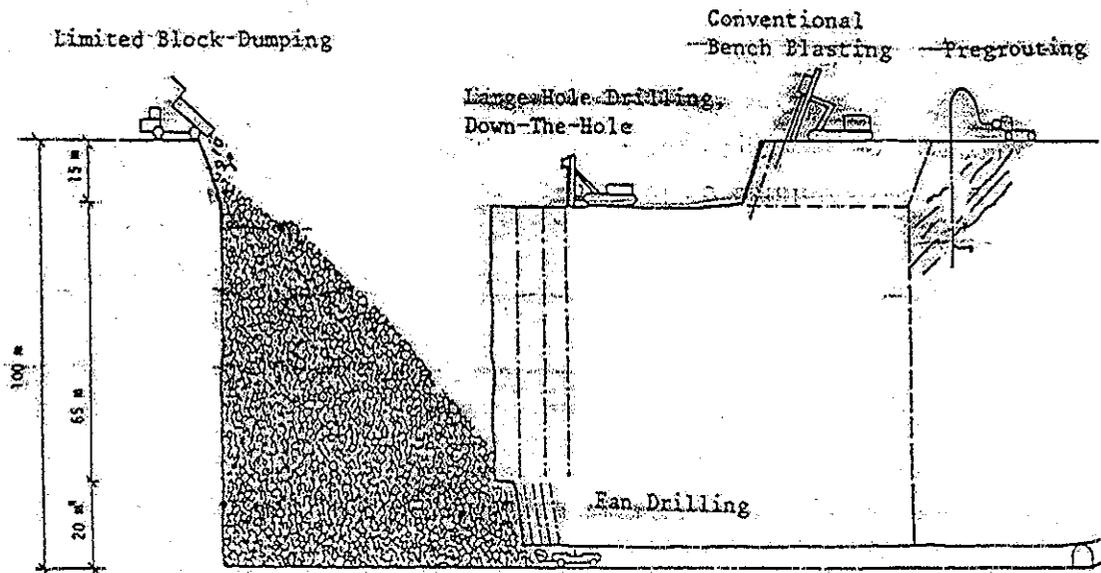
Las grandes cavidades cilíndricas verticales pueden construirse por dos procedimientos. En caso de cavidades poco profundas puede realizarse la excavación por bancos, hormigonando un revestimiento cilíndrico contra el terreno por anillos descendentes, de modo que cada nuevo anillo recalce al anterior, que queda «colgado» por rozamiento; para grandes diámetros puede ser muy rápido y económico, en especial si hay posibilidad de desalojar el detritus a través de un pozo central y una galería inferior. Una cúpula enterrada da el carácter de subterráneo a este gran pozo; el cimbrado con un arco que gira respecto a un eje vertical es una solución ingeniosa y económica para la construcción de la cúpula. Con este procedimiento no será difícil alcanzar los 100 m de luz, pese a que la roca próxima a la superficie no alcanza la misma calidad que en profundidad.

Otro sistema es el de vaciado por disolución, típico en minas de sal, en que se realiza un sondeo previo de varios cientos de metros de altura y desde él se crea un flujo de agua caliente, que disuelve la sal, aumentando lentamente el diámetro de la cavidad hasta el valor máximo compatible con la estabilidad de la cúpula natural que se forma en el terreno, y que llegó a alcanzar los 145 m en las minas del golfo de San Lorenzo. Aunque este método se emplea en minería, resulta también apropiado para crear almacenamientos subterráneos de fluidos, si bien la idea más extendida es aprovechar con dicho fin precisamente las minas de sal ya explotadas, y que se mantienen con agua saturada en su interior.

La gran cavidad subterránea construida como falso túnel, trabajando con maquinaria propia de una cantera, permite reducir a menos de la mitad el precio de excavación, con taladros verticales mucho más largos y de mayor diámetro, más separados entre sí (Fig 16). La posterior bóveda tapada con tierra permite mantener muchas de las ventajas de las grandes excavaciones subterráneas antes mencionadas (seguridad frente a accidentes o bombardeos, aislamiento, etc., salvo el de resistir grandes presiones gracias a la carga geostática a mayor profundidad), aunque realmente estén perforadas a cielo abierto a coste muy inferior.

Una idea atrevida e ingeniosa es emplear en una gran cavidad subterránea excavada en mina la técnica de excavación de canteras a cielo abierto, lo que puede reducir su coste a la mitad (Fig.17). Varias galerías superiores permiten el empleo de maquinaria pesada de perforación vertical, y una galería inferior permite la retirada de detritus. Debe utilizarse en roca de buena calidad, con sostenimiento casi inexistente, ya que tendría un coste unitario incrementado al necesitar la ayuda de andamiajes, colgados o apoyados.

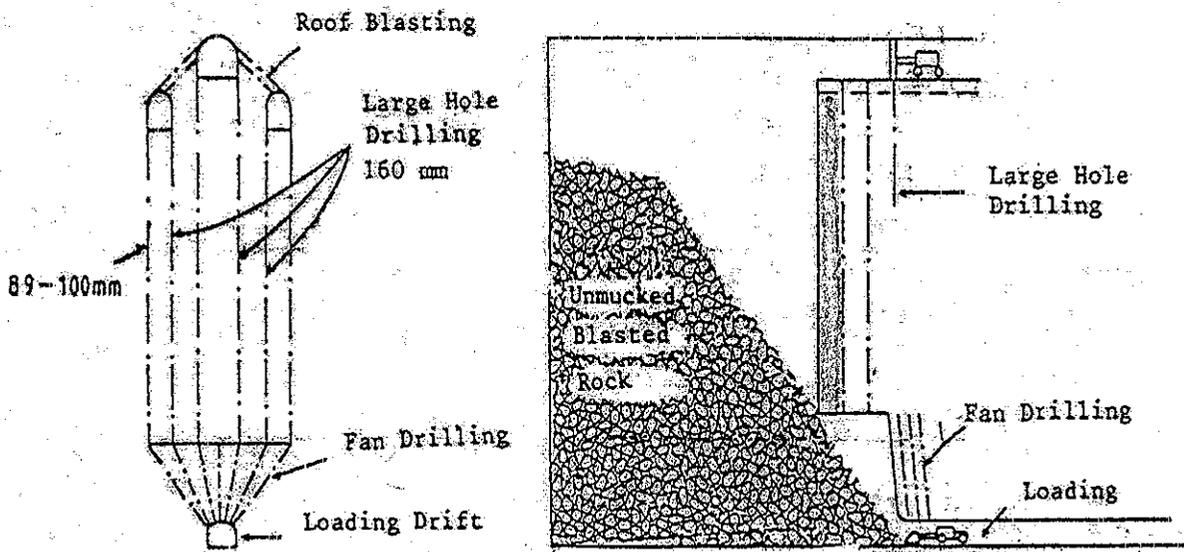
En países nórdicos en que existen centrales de agua caliente para la calefacción de una ciudad o de un gran barrio, se puede resolver el almacenamiento de la energía mediante la técnica del párrafo anterior, pero dejando toda la cavidad llena de detritus y extrayendo solo la proporción mayor a uno del coeficiente de esponjamiento, con lo que desaparece el problema de la inestabilidad de las paredes (Fig.18). El volumen de agua caliente que cabe se reduce a la cuarta o quinta parte del volumen de la caverna, pero el detritus también almacena calor y aporta inercia al sistema. El aislamiento natural del terreno permite una economía al reducirse mucho las pérdidas y el coste de los materiales aislantes artificiales a emplear.



Principle for mining of blockfilled, in-ground pit.

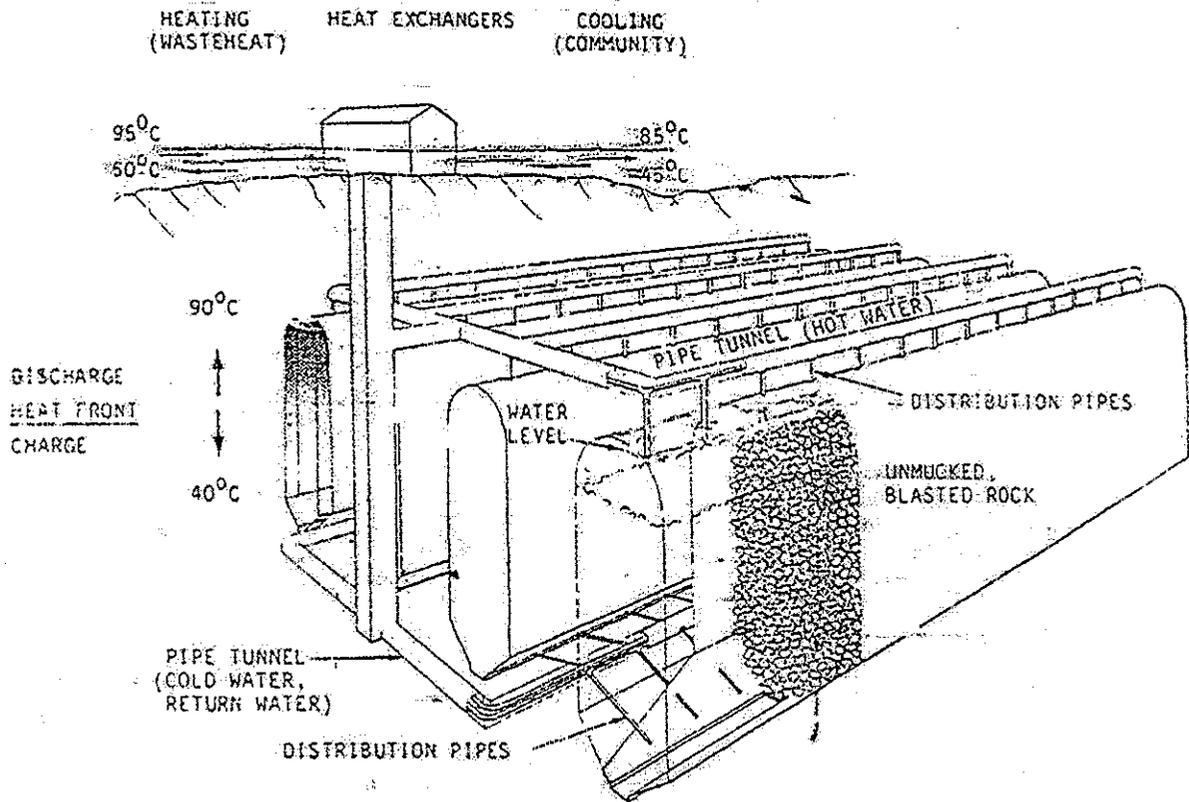
Figura 16

U. Lindblom



Principle of mining of a blockfilled cavern.

Figura 17



Layout of blockfilled caverns for seasonal storage of warm water.

Figura 18

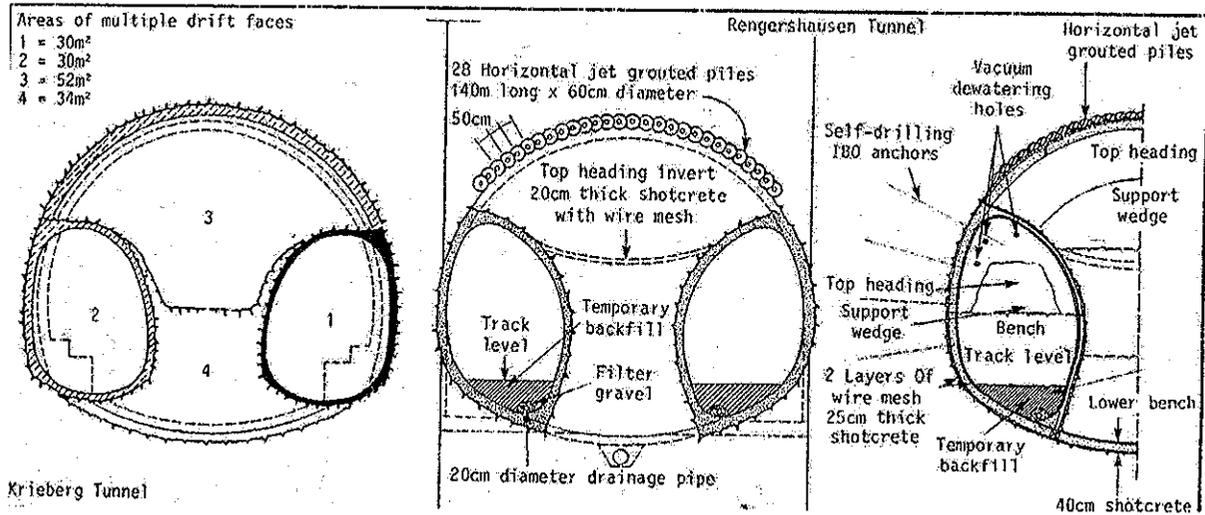


Figura 19

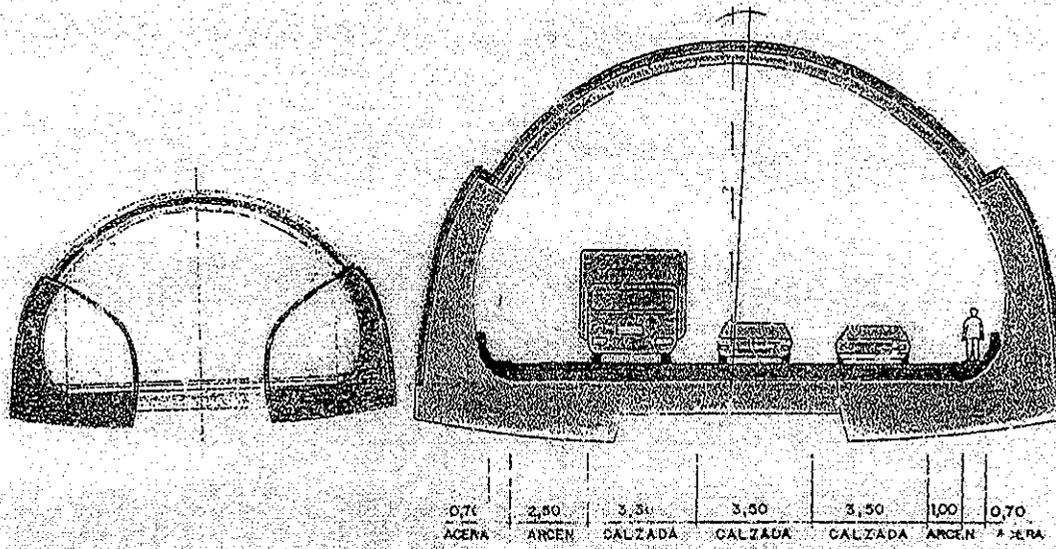


Figura 20

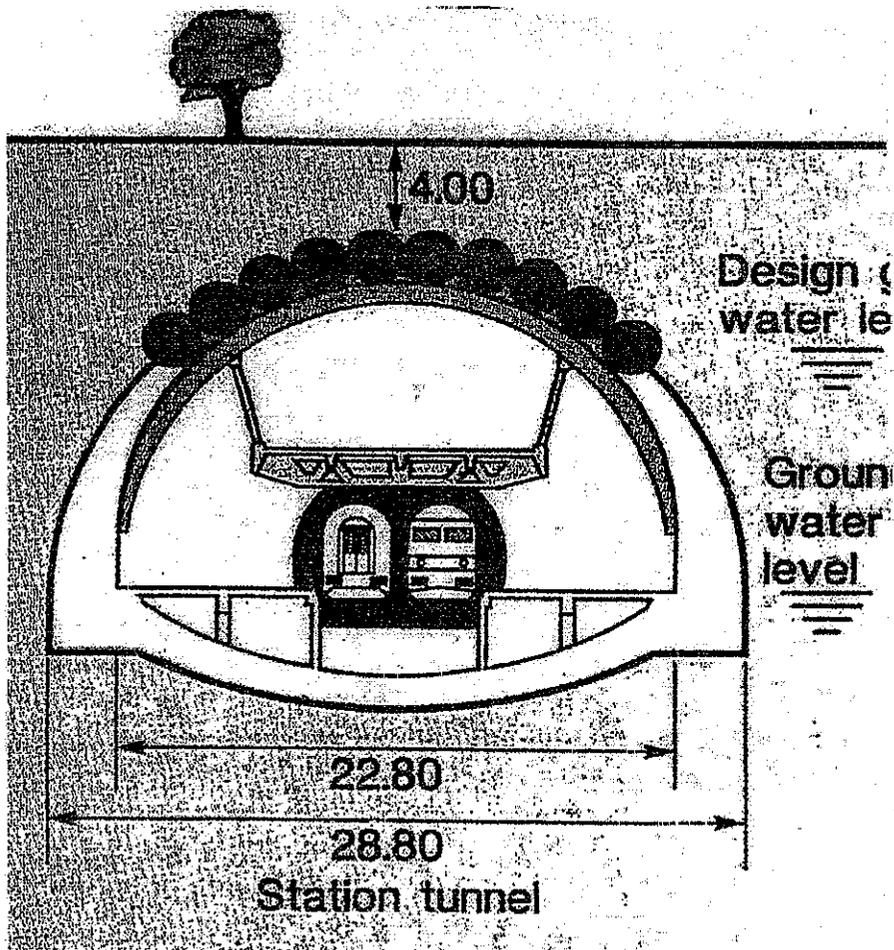


Figura 21

Sin llegar a esas dimensiones, en la ingeniería civil de transporte ha influido el desarrollo de las grandes excavaciones. Los túneles viarios de gran capacidad, para cuatro carriles de circulación de automóviles, construidos en suelos de resistencia media adaptando el método alemán, tan frecuente en estaciones de ferrocarril metropolitano, comenzando por galerías muy amplias en los hastiales, para luego excavar la zona de bóveda y finalmente la destroza inferior, con la particularidad del tamaño muy ampliado de las galerías de arranque, se iniciaron en el túnel de Kriberg y luego se han ido extendiendo incluso en terrenos de peor calidad (Fig.19) y en obras españolas, como la M-40 madrileña (Fig.20).

Otro de los muchos ejemplos posibles son la estación subterránea "Venecia" de ferrocarril en Milán (Fig.21), de 29 m de ancho con una montera de solo 4 m y con un nivel freático alto, o el aparcamiento subterráneo de 250 m² de y 5 niveles en Landsberg (Alemania, 1991).

4. DISEÑO Y CÁLCULO

El primer punto y el más importante a decidir es el emplazamiento de la excavación, que suele venir condicionado a un área limitada por la proximidad a cierto lugar, como es el caso de una central hidroeléctrica próxima a una presa, o una central de bombeo reversible cercana a un centro de consumo, o un almacenamiento de combustible próximo a una refinería y a un puerto. La selección de una roca homogénea y resistente, permitirá una notable economía en la construcción y condiciona el tamaño máximo práctico de la sección a excavar.

Debe huirse de rocas expansivas, de zonas muy tectonizadas y con relleno arcilloso blando en las juntas, de zonas descomprimidas próximas a valles y fallas, y debe definirse la profundidad mínima para asegurar cierto espesor de techo por debajo de la zona meteorizada.

Es muy importante un estudio completo de la roca, que incluya sondeos, galerías de reconocimiento, pruebas de carga in situ, medición de las tensiones iniciales del terreno, condiciones hidrogeológicas, etc. En función de sus resultados y de la estratificación, accidentes y zonas débiles de la roca, su orientación y buzamiento, debe fijarse la posición del eje de la excavación para minimizar los problemas de estabilidad, según la bisectriz del ángulo entre los dos sistemas dominantes de juntas, evitando una coincidencia de esta dirección con una tercera familia de juntas.

Debe aclararse si el comportamiento de la excavación corresponderá a una «profunda» o a una «poca profunda». En estas últimas la relación entre cobertura y luz es pequeña y las tensiones bajas, con un efecto menor de interconexión entre bloques de roca que puede dificultar la formación de un efecto arco que autosoporte el peso del terreno. Por el contrario, en las excavaciones profundas las tensiones son tan fuertes o tan anisótropas que pueden plastificar la roca y crear problemas. A unas profundidades intermedias suele presentar la roca un comportamiento mejor.

La forma de sección transversal debe tender a la de una elipse, con relación de diámetros dependientes de las tensiones iniciales del terreno, escogiéndose frecuentemente del orden de 1,5 o algo mayor, para evitar la aparición de tracciones

tan dañinas en un material discontinuo como es una roca. Es fundamental el redondeo de la sección logrado a través del precorte, así como no dar radios de curvatura demasiado pequeños, para evitar concentraciones de tensiones perjudiciales y fisuras. En general se adopta la forma de herradura, con paredes laterales curvas si la tensión horizontal es pequeña, y si no, la forma ovoidal. También deben evitarse zonas convexas como posibles encuentros o intersecciones entre cavidades de diferente tamaño, que serían inestables. A veces se da forma asimétrica a la bóveda cuando las tensiones iniciales principales están inclinadas, debido a la estratificación del terreno o a la proximidad de una ladera.

La forma debe también tener en cuenta consideraciones constructivas. Debe pensarse en el proceso de excavación, frecuentemente por fases, donde la realización de la destroza o bancos inferiores pueden tener un coste unitario del orden de la mitad que el de la fase primera de la bóveda o corona. Sin embargo, la altura o esbeltez de la sección no debe ser exagerada, por las consideraciones del estado tensional antes citados y en el caso de almacenamiento de líquidos, por el cambio de presiones resultante entre las situaciones de llenado y vaciado.

Las dimensiones de la cavidad no solo se define en base a cálculos estáticos detallados, basados en los parámetros característicos del comportamiento del material mas fiables posibles, sino también en reglas empíricas a partir de numerosos túneles realizados en diferentes rocas y en diferentes circunstancias, contrastadas, a ser posible, en el propio lugar con cavernas piloto o en el inicio de la obra.

Si la roca es de mediana calidad, debido a que el revestimiento necesario para una gran luz suele resultar económicamente prohibitivo, debe recurrirse a alcanzar la mayor luz que sea compatible con unas tensiones pésimas en el terreno tales que resulte un coeficiente de seguridad del orden de cuatro respecto la rotura, y ello con sólo un soporte artificial reducido (bulones y anclajes preferentemente, revestimiento delgado sólo en la bóveda, gunitado, inyecciones).

Un aumento de luz puede permitir el empleo de métodos y maquinaria más económicos, pero obliga a aumentar la altura, lo cual a veces no se traduce en un volumen aprovechable; también obligaría a separar proporcionalmente entre sí un conjunto de túneles paralelos, ya que las paredes intermedias suele tener un espesor análogo a la altura. En rocas ígneas y metamórficas sanas las luces más económicas actuales rondan los 25 m y en las sedimentarias se sitúan entre 10 y 15 m. El paso de una sección de 60 m² a otra de 400 m² puede reducir los costes en un factor de 2,5 en roca muy sana (Fig. 6).

Para alcanzar el volumen deseado con frecuencia hay que recurrir a un conjunto de cavidades interconectadas. Cada caverna se puede prolongar a modo de túnel hasta una longitud que puede venir condicionada por el plazo total de la obra, soliendo disponerse en un conjunto de túneles paralelos conectados por otro u otros menores perpendiculares.

La definición del revestimiento debe ser versátil para adaptarse a las circunstancias locales de la roca en cada punto. Un revestimiento completo tendría un coste varias veces superior al de la excavación y quizás no soportase la presión del agua con la cavidad vacía. Si el uso de la cavidad implica la presencia de personal o de maquinaria costosa (centrales hidroeléctricas, cavidades para habitación, militares e industriales,

etc.), se debe colocar un revestimiento de hormigón en la bóveda, de un espesor mínimo de 30 cm. El gunitado proyectado de la bóveda puede costar entre un 30% y un 50% del coste de excavación, y el bulonado sistemático del 20% al 40%. La experiencia indica que cuando crece el peso de la montera, la luz de la cavidad, y disminuye el ángulo de rozamiento Φ de las rocas aumenta la eficacia de los anclajes respecto a la de una gunita, por ello el bulonado, es la medida más usual, tendiendo a longitudes de anclajes largas proporcionadas al ancho de la cavidad, para formar sistemáticamente una bóveda de roca armada.

Es habitual el empleo del método de los elementos finitos en el proyecto de grandes excavaciones subterráneas, que hacen que sea más indicada su utilización que en caso de túneles normales, en los que con frecuencia se abusa del mismo. La importancia económica debida al tamaño de la construcción justifica el usar los métodos más sofisticados, el mayor conocimiento del terreno permiten una definición más fiable de los valores numéricos asignados a los parámetros geotécnicos y a las posibles heterogeneidades o discontinuidades del terreno, que se pueden reproducir con fidelidad.

Aparte del cálculo tensodeformacional propiamente dicho existen con frecuencia otros dos aspectos a estudiar y cuantificar que no suelen ser tan importante en los túneles normales.

Uno de ellos es el análisis de los flujos de agua, de la extensión del cono de depresión o de la posición del nivel freático, así como de las posibles recargas artificiales. Sus resultados deben contrastarse mediante un número suficiente de piezómetros, pues como se sabe pequeños detalles geológicos afectan mucho a la trasmisividad del terreno. Estos análisis pueden tener gran importancia en los almacenamientos de fluidos.

El otro estudio es el de flujos térmicos creados en los almacenamientos de materias frías o calientes, tanto por los consumos de energía que implican como por las tensiones parásitas que crean, que pueden ser críticas. El ahorro de energía se logra con cavernas de mayor sección y por ello de menor superficie específica, y con cavernas próximas entre sí, para que mutuamente se ayuden a conservar la temperatura.

En el caso de calor, la roca sufrirá fuertes compresiones circunferenciales por dilatación que se superponen a las inducidas por la excavación, debiéndose cuidar al máximo el redondeo de las formas. Debe tenerse en cuenta que las propiedades tensodeformacionales del terreno pueden variar con la temperatura.

En el caso de frío la contracción térmica descomprime la roca y abre las fisuras, aumentando la permeabilidad de la roca.

Se ha comprobado que el régimen permanente del flujo térmico se puede tardar en alcanzar desde 4 meses hasta 4 años, dada la gran inercia térmica de la masa de roca afectada, reduciéndose después el consumo de energía requerido para conservar la temperatura a la cuarta parte del que hubo al principio.